Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LOS TÚNELES FERROVIARIOS DE GRAN LONGITUD

Autor/a

Alberto Beltrán Montero

Tutor/a

Andrés López Pita

Departament

Transportes

Intensificació

Data

Noviembre 2011

Contribución al estudio de los túneles ferroviarios de gran longitud

Autor: Alberto Beltrán Montero

Tutor: Andrés López Pita

RESUMEN

En las últimas décadas estamos viviendo un fenómeno de expansión de las líneas ferroviarias de alta velocidad en todo el mundo. Los exigentes trazados de este tipo de líneas obligan a construir túneles de gran longitud y a grandes profundidades para poder atravesar los sistemas montañosos más importantes.

La construcción de túneles de más de 20 kilómetros de longitud con coberteras superiores a los 1.000 metros, sigue siendo, a pesar del elevado número de proyectos de grandes túneles ejecutados, en construcción o planificados, un desafío que busca los límites de la capacidad científica, tecnológica y financiera de un país.

En el presente estudio se pretende demostrar que este tipo de túneles presentan características diferenciadoras con respecto a los túneles cortos tradicionales y que, por tanto, se deben de tener en cuenta tanto en la fase de diseño, como en las de construcción y explotación.

Las características del trazado de los túneles de gran longitud permiten circular a los trenes a velocidades muy elevadas, por lo que los fenómenos aerodinámicos pasan a ser el principal criterio a la hora de diseñar la sección transversal. Pero, a diferencia de los túneles cortos, en los túneles de gran longitud la resistencia aerodinámica resulta ser el fenómeno limitante, en lugar de las variaciones de presión.

La necesidad de acortar los largos plazos que requiere la construcción de túneles de estas características ha llevado a desarrollar nuevos métodos de excavación mecanizados. En la tesina se analiza la aplicación de estos métodos modernos, así como la de los métodos más tradicionales, a la excavación de este tipo de túneles.

La seguridad es uno de los principales condicionantes del proyecto de los túneles de gran longitud, por lo que se incluye un estudio sobre la tendencia actual en cuanto a medidas de seguridad en este tipo de túneles.

Finalmente, se presentan los beneficios socioeconómicos que pueden aportar este tipo de obras, con ánimo de justificar sus elevados costes.

Para justificar las conclusiones obtenidas se ha realizado un estudio de investigación sobre ocho de los túneles más largos y famosos del mundo.

Palabras clave: Túneles gran longitud, alta velocidad, resistencia aerodinámica, TBM, NATM.

Contribution to the study of great length railway tunnels

Author: Alberto Beltrán Montero

Tutor: Andrés López Pita

ABSTRACT

In recent decades, we have been experiencing a phenomenal expansion of high-speed rail lines throughout the world. Such lines have demanded paths, which require the construction of great lengths and depths of tunnels to go through the major mountain systems.

The construction of tunnels more than 20 kilometers long with coverage above 1000 meters, is still, despite the high number of large tunnel projects which have been executed or planned, a challenge for any country scientifically, technologically and financially.

The present study is to demonstrate that these kinds of tunnels have distinguishing characteristics compared to traditional short tunnels, and, therefore, must be taken into account both in the design phase, as in the construction and operation phases.

The characteristics of great length tunnels allow trains to run at very high speeds, so the aerodynamic phenomena becomes the main criterion in designing the cross section. But, unlike the short tunnels, large tunnels drag turns out to be the limiting factor, rather than pressure variations.

The need to shorten the long lead times required by the construction of these kind of tunnels has led to the development of new methods of mechanized excavation. The thesis discusses the application of these modern methods, as well as the more traditional ones, to the construction of large tunnels.

Security is one of the primary concerns for large tunnel projects, so a study of the current trend in terms of security measures in these types of tunnels is included.

Finally, economic benefits that can provide this type of work are presented, intending to justify their very high costs.

In order to justify the conclusions drawn, there has been a research study on eight of the longest and most famous tunnels in the world.

Keywords: Great length tunnels, high-speed, aerodynamic resistance, TBM, NATM.

ÍNDICE

Resumen…….. I
Abstract……... II
Índice……... III

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción…….. 1
1.2. Objetivos…… 2
1.3. Breve referencia a la evolución histórica de los grandes túneles…….. 2
1.4. Tipos de túneles ferroviarios…….. 4
1.5. Túneles ferroviarios de gran longitud analizados…….. 5
1.5.1. Características generales……. 5
1.5.2. Principales escenarios……. 6
1.5.2.1. Suiza…… 6
1.5.2.2. Japón…… 9
1.5.2.3. Túnel de base del Brenero…… 10
1.5.2.4. Túnel de base de Mont d'Ambin……. 11
1.5.2.5. España……. 12
1.5.2.6. Túnel del Canal de la Mancha……. 14

2. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES EN CUANTO A CRITERIOS DE DISEÑO

2.1. Diseño del trazado……. 15
2.1.1. Condicionantes del trazado…… 15
2.1.2. Parámetros del trazado…….. 15
2.2. Diseño de la sección transversal…… 17
2.2.1. Introducción…….. 17
2.2.2. Principales fenómenos que ocurren al pasar un tren por un túnel…. 17
2.2.2.1. Entrada en el túnel: ondas compresivas y expansivas……. 17
2.2.2.2. Presión en los laterales del tren en el túnel……. 19
2.2.2.3. Circulación del tren por el túnel: resistencia aerodinámica……. 20
2.2.2.4. Superposición de efectos en túneles de vía doble……... 20
2.2.3. Criterios de diseño para la selección del diámetro del túnel…….. 21
2.2.3.1. Criterio de confort……... 21
2.2.3.2. Criterio de salud…….. 22
2.2.3.3. Incremento de la resistencia que se opone al avance del tren…… 22

2.2.4. Efecto sobre la longitud del túnel……... 23
2.2.4.1. Túneles muy cortos……. 23
2.2.4.2. Túneles largos……. 24
2.2.4.3. Túneles muy largos……. 24
2.2.5. Comparativa y análisis de las secciones transversales de los túneles estudiados…… 24

3. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES EN CUANTO A CRITERIOS CONSTRUCTIVOS

3.1. Condicionantes geomecánicos en los grandes túneles de base……. 27
3.2. Métodos constructivos…….. 29
3.2.1. Excavación con máquinas integrales (TBM)……. 29
3.2.1.1. Topos…….. 30
3.2.1.2. Escudos…….. 32
3.2.1.2.1. Escudos abiertos……. 34
3.2.1.2.2. Escudos cerrados…… 34
3.2.1.3. Dobles escudos……... 37
3.2.1.4. Características de las tuneladoras empleadas en los túneles estudiados…… 38
3.2.2. Excavación mediante el Nuevo Método Austríaco (N.A.T.M.)…… 40
3.2.2.1. Excavación con explosivos……. 42
3.2.2.2. Excavación con máquinas rozadoras…….. 44
3.2.3. Comparativa entre la excavación mediante TBM y mediante métodos de frente abierto en los grandes túneles ferroviarios…… 47
3.2.3.1. En cuanto a seguridad……. 47
3.2.3.2. En cuanto a costes (comparación de avances medios)…… 48

4. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES EN CUANTO A CRITERIOS DE SEGURIDAD

4.1. Introducción……. 55
4.2. Configuración general de los grandes túneles…….. 55
4.3. Esquemas funcionales y análisis de las medidas de seguridad adoptadas por los túneles analizados…… 58
4.3.1. Túnel de base del Gotardo…… 58
4.3.2. Túnel de base del Brennero……... 60
4.3.3. Túnel de Seikan……. 62
4.3.4. Túnel de base de Mont d'Ambin……... 63
4.3.5. Eurotúnel……... 65
4.3.6. Túnel de base de Lotschberg……. 66
4.3.7. Túnel de Guadarrama…… 68
4.3.8. Túneles de Pajares……. 69

4.4. Zonas exteriores…… 71

5. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE CARÁCTER SOCIOECONÓMICO

5.1. Breve análisis de los costes generales……... 72
5.2. Beneficios obtenidos por la explotación……... 73
5.2.1. Reducción de tiempo de viaje…… 73
5.2.2. Incremento de la eficiencia del transporte de mercancías…….. 75

6. CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones respecto a criterios de diseño……. 77
6.2. Conclusiones respecto a criterios constructivos……... 78
6.3. Conclusiones respecto a criterios de seguridad…… 78
6.4. Conclusiones respecto a características de carácter socioeconómico…… 79

7. BIBLIOGRAFÍA

7.1. Referencias bibliográficas…… 80
7.2. Referencias sobre páginas web…… 81

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería civil ha experimentado un enorme progreso durante los últimos 50 años, no obstante, la excavación de túneles de gran longitud y a grandes profundidades continúa suponiendo un reto impresionante para la ciencia y las sociedades humanas.

Excavar túneles de más de 20 kilómetros de longitud (no digamos ya los superiores a 50 kilómetros), con coberteras superiores a los 1.000 metros, es un desafío que busca los límites de la capacidad científica, tecnológica y financiera de un país, aunque en la actualidad pueda parecer, en base al elevado número de proyectos de grandes túneles ejecutados, en construcción o planificados, que estas obras pueden ser sencillas y que se trata de un horizonte ya superado. Nada más lejos de la realidad. Si por algo se caracterizan las obras subterráneas de gran longitud es por un elevado grado de incertidumbre derivado de las complejidades que pueden surgir en un macizo que se pretende atravesar. Por ello, cada uno de los grandes túneles que se acometen en el mundo se convierte en un nuevo pulso en el que se requiere la máxima dotación científica, tecnológica y económica para poder superar las dificultades inherentes a este tipo de proyectos.

Los túneles de base y a gran profundidad están caracterizados por las condiciones extremas, especialmente en materia de seguridad, a lo largo de toda la vida de la infraestructura: diseño, construcción y explotación. Estas condiciones extremas se reflejan en aspectos como:

- Los métodos de investigación y los parámetros a obtener en relación a las condiciones geológicas del macizo, a la hidrogeología y las características geomecánicas, fundamentales en túneles con grandes coberteras: fenómenos de squezzing, rock bursting, temperatura del macizo, zonas tectonizadas con enormes presiones de agua intersticial, etc…
- La gestión del riesgo en materia de seguridad y salud, situación que se agrava cuanto mayor longitud tenga el túnel: la fase de diseño se prolonga por la necesidad de contemplar un espectro de riesgos muy amplio, la construcción moviliza un número muy elevado de recursos humanos y materiales, con un impacto social potencial muy elevado, y la explotación de la infraestructura se torna muy compleja y costosa.
- Centrándonos en la fase constructiva, los túneles de gran longitud requieren una logística de enormes prestaciones, con impacto a nivel regional, dada la enorme demanda de recursos que absorbe la obra, exigiendo un tejido productivo capaz de responder a esta demanda.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal del estudio realizado es determinar y analizar las características especiales que diferencian a los túneles de gran longitud de los túneles cortos tradicionales. Las características analizadas se clasifican en cuatro tipos:

- Características especiales en cuanto a criterios de diseño. Por un lado se analizan las particularidades que presentan este tipo de túneles en cuanto a condicionantes del trazado, y por otro, se estudian los diferentes criterios de selección de diámetro existentes, para determinar el más adecuado para este tipo de túneles.
- Características especiales en cuanto a criterios constructivos. Se analizan los diferentes procesos constructivos empleados en la excavación de túneles para determinar el más apropiado para los túneles de gran longitud.
- Características especiales en cuanto a criterios de seguridad. Determinación y análisis de la tendencia actual en cuanto a medidas de seguridad en este tipo de túneles, a partir del estudio de seguridad de cada uno de los túneles analizados.
- Características especiales de carácter socioeconómico. Presentación de los beneficios socioeconómicos que pueden aportar este tipo de obras, al objeto de justificar sus elevados costes.

Para justificar las conclusiones obtenidas se ha realizado un estudio de investigación sobre los seis túneles más largos del mundo (en servicio o en construcción) y sobre los dos túneles más largos de España.

1.3. BREVE REFERENCIA A LA EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS GRANDES TÚNELES

El incremento de la productividad que supuso la llegada de la Revolución Industrial durante el siglo XIX produjo una gran extensión de la red ferroviaria europea, motivada por la necesidad de expandir el comercio. Esta extensión se consiguió sin mayores dificultades en todos los países de la gran llanura europea así como en Inglaterra, pero el cruce de las grandes barreras naturales se convirtió en un handicap para el crecimiento comercial de determinadas regiones. Así, los primeros trazados ferroviarios surgidos para salvar las grandes cordilleras buscaban largos recorridos aprovechando los valles fluviales para disminuir la pendiente, buscando de igual modo minimizar la longitud de los túneles y viaductos que, inexorablemente, resultaban necesarios en gran parte de dichos trazados. De esta forma, los primeros cruces de la gran barrera de los Alpes fueron el resultado de este compromiso, con túneles cortos a grandes altitudes e interminables rampas ferroviarias de pendiente admisible y radios mínimos. Pero incluso con este nivel de compromiso, surgieron los primeros túneles de gran longitud. En la tabla 1.1 se muestran algunas de sus principales características.

Túnel	Longitud (kms)	Año	País
Frejús	13,7	1871	Francia-Italia
San Gotardo	15,0	1882	Suiza
Simplon	20,0	1906	Suiza
Löchtsberg	14,6	1913	Suiza

Tabla 1.1. Primeros túneles ferroviarios de gran longitud. Fuente: [12]

Cabe destacar que la realización del túnel, de Mont-Cenis, de 13,7 km, supuso un extraordinario campo de experiencias para las primeras aplicaciones del aire comprimido en la perforación de túneles. Por otra parte, el túnel de San Gotardo alcanzó notoriedad por la construcción de sus célebres tramos helicoidales en ambas vertientes, como puede apreciarse en la figura 1.1.

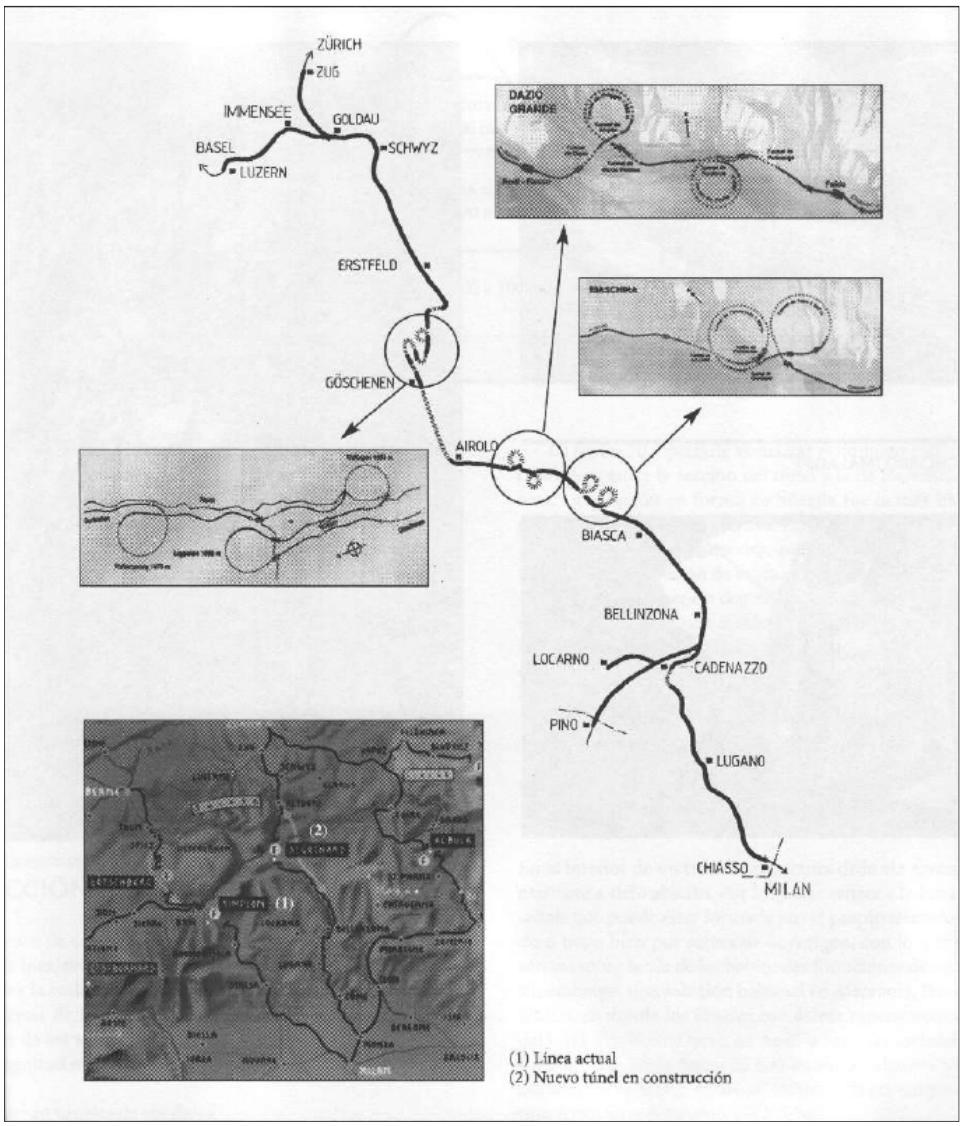

Figura 1.1. Trazado del antiguo túnel de San Gotardo. Fuente: [9]

En Japón la construcción de los primeros túneles de gran longitud comenzó entorno al año 1920, con los túneles de Shimizu (9,7 kms) y Tanna (7,8 kms). A partir de la Segunda Guerra Mundial, el desarrollo de la red ferroviaria quedó sustituido por el auge del transporte por carretera, principalmente en los Estados Unidos y en Europa. Comenzaron a desarrollarse en la mayoría de los países industrializados las redes de autopistas y carreteras de altas prestaciones. Con este desarrollo llegaron también los grandes túneles carreteros: Mont Blanc (1965, longitud 11,6 kms) y San Gotardo (1980, longitud 16,9 kms) entre otros. Japón, sin embargo, perseveró en el desarrollo de su red ferroviaria, dando lugar a los famosos trenes-bala en la década de los sesenta, y en 1971, tras más de 10 años de investigaciones y diseño, comenzó la construcción del túnel que a día de hoy continúa siendo el de mayor longitud del mundo en servicio, el túnel del Seikan, que enlaza las islas de Honshu y Hokkaido con una longitud de 53,8 kilómetros y cuya puesta en servicio se produjo en el año 1988. La construcción del túnel de Seikan se ha visto continuada por una larga lista de proyectos de túneles de gran longitud, que se resumen en la tabla 1.2.

Túnel	Longitud (kms)	Situación	Tipo	País
San Gotardo	57,0	En construcción	Ferroviario	Suiza
Brenero	56,0	En construcción	Ferroviario	Austria-Italia
Lyon – Turín	53,0	En proyecto	Ferroviario	Francia-Italia
Eurotunnel	50,4	En servicio	Ferroviario	Francia-Gran Bretaña
Löchtsberg	34,6	En servicio	Ferroviario	Suiza
Guadarrama	28,4	En servicio	Ferroviario	España
Hakkoda	26,4	En construcción	Ferroviario	Japón
Iwate	25,8	En servicio	Ferroviario	Japón
Pajares	24,6	En construcción	Ferroviario	España
Laerdal	24,5	En servicio	Carretero	Noruega

Tabla 1.2. Lista de túneles de gran longitud posteriores al túnel de Seikan. Fuente: [12]

La lista de túneles mundiales en servicio, en ejecución, o en proyecto, de longitudes entre 10 y 23 kilómetros puede ser inagotable, a pesar de estar hablando de túneles de longitudes enormes. Esto puede llevar a pensar al profano en la materia que se trata de actuaciones perfectamente asumibles, cuando, en realidad, cada uno de estos túneles es una gran obra singular [12].

1.4. TIPOS DE TÚNELES FERROVIARIOS

Es habitual recurrir a clasificar los túneles en función de la altitud geográfica por la que discurren, diferenciándose habitualmente los denominados túneles de cota, de media altura y de base [9]. La figura 1.2 permite visualizar la citada clasificación.

Al primer grupo pertenecen en general los túneles de carretera y se caracterizan por su relativa corta longitud. En el ámbito ferroviario cabe destacar el túnel de Albula, cuyo punto culminante se encuentra a 1823 m de altura.

En el segundo grupo, formado por los túneles de media altura (1100-1300 m), se encuentran la mayor parte de los primeros túneles ferroviarios de gran longitud, como el túnel de Mont-Cenis (1298 m), Alberg (1311 m), Lötschberg (1240) y San Gotardo (1151 m).

Finalmente, en el grupo de los túneles de base se sitúan los túneles construidos a las cotas más bajas, atravesando los macizos montañosos a cota de valle y soportando unas coberteras que pueden llegar a ser tremendamente grandes. Esta tipología de túnel permite reducir considerablemente la pendiente de la línea férrea a la que pertenece, por lo que la gran mayoría de los túneles de las líneas de alta velocidad, y en concreto los de gran longitud, pertenecen a este grupo.

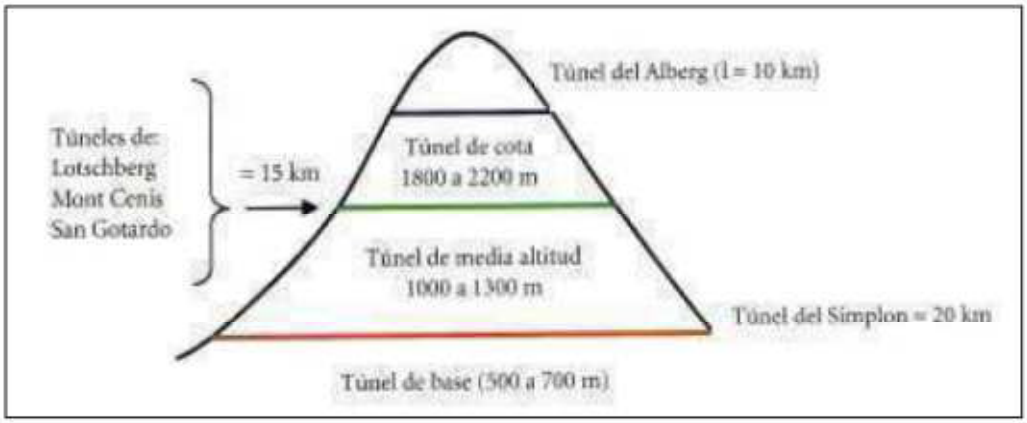

Figura 1.2. Clasificación de los túneles en función de la altitud geográfica. Fuente: [9]

1.5. TÚNELES FERROVIARIOS DE GRAN LONGITUD ANALIZADOS

1.5.1. Características generales

La tabla 1.3 muestra las características generales de los 8 túneles objeto de análisis.

TÚNELES FERROVIARIOS DE GRAN LONGITUD					
Nombre	País	Línea	Accidente Geográfico	Longitud (km)	Fecha apertura
St. Gotthard	Suiza	Zurich-Milán	Alpes	57	(2017)
Brennero	Austria-Italia	Berlín-Palermo	Alpes	55	(2020)
Seikan	Japón	Tokaido	Estrecho Tsugaru	53,9	1988
Mont D'Ambin	Francia-Italia	Lyon-Turín	Alpes	53,1	(2020)
Eurotúnel	Francia-Inglaterra	París-Londres	Canal de la Mancha	50,5	1994
Lötschberg	Suiza	Berna-Milán	Alpes	34,6	2007
Guadarrama	España	Madrid-Valladolid	Sierra de Guadarrama	28,4	2007
Pajares	España	León-Asturias	Puerto de Pajares	24,9	(2012)

Tabla 1.3. Características generales de los túneles estudiados. Fuente: elaboración propia

1.5.2. Principales escenarios

1.5.2.1. Suiza

El constante crecimiento del tráfico de pasajeros y de mercancías desde 1980 llegó a colapsar las infraestructuras existentes. Este hecho impulsó en 1992 la aprobación de un ambicioso plan de infraestructuras llamado the New Rail Link through the Alps (NRLA), con el objetivo de canalizar la mayor parte del creciente tráfico a través del ferrocarril. Al desarrollar este plan, Suiza se integra en la creciente red europea de alta velocidad y consigue acercar los centros económicos de ambos lados de los Alpes conectando la red de alta velocidad alemana con la italiana.

El NRLA incluye dos nuevos túneles ferroviarios, uno a través del macizo de Lötschberg, el túnel de base de Lötschberg con una longitud de 34,6 km y otro a través del macizo de San Gotardo, el túnel de base del Gotardo con una longitud de 57 km. Ambos túneles se pueden visualizar en el mapa de suiza de la figura 1.3.

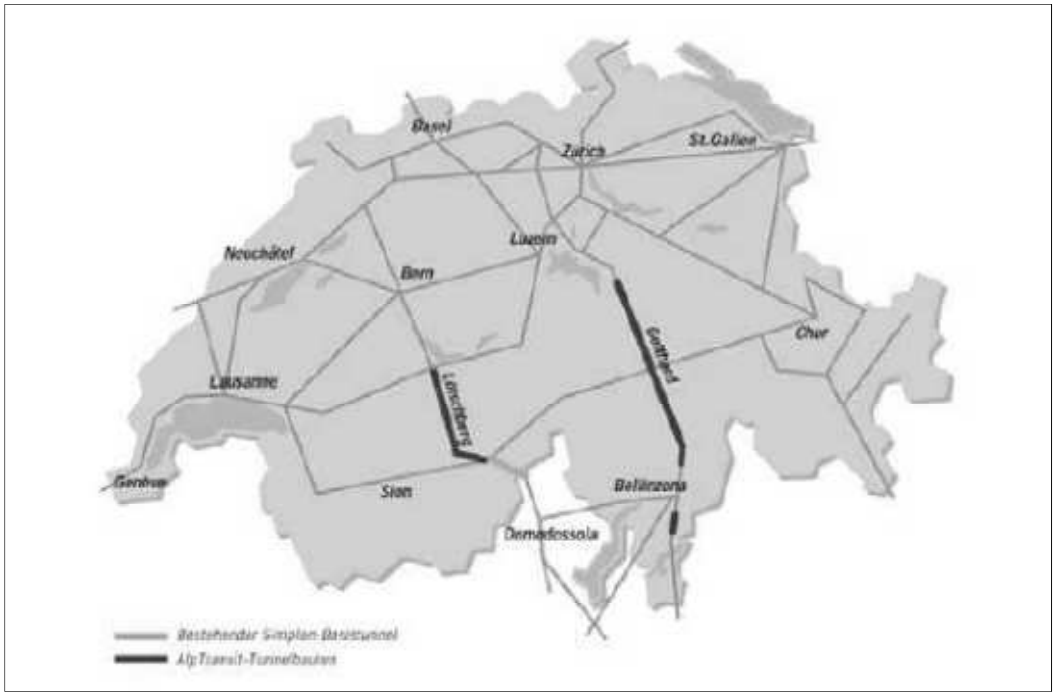

Figura 1.3. Red Ferroviaria suiza. Fuente: [1]

- *Túnel de base del Gotardo*

El túnel de base del Gotardo es un túnel ferroviario bajo los Alpes en Suiza y forma parte de la nueva línea Zúrich-Milán. Con una longitud de 57 km y un total de 151,84 km de túneles excavados, es el túnel ferroviario más largo del mundo. Las bocas del túnel están situadas cerca de las ciudades de Erstfeld (norte) y Bodio (sur).

La perforación concluyó el 15 de octubre de 2010 y su entrada en servicio está prevista para el año 2017.

El proyecto de la nueva línea de alta velocidad entre Zúrich y Milán contempla la construcción de otros dos túneles de base de gran longitud: el túnel de base de Zimmerberg de 20 km de longitud y el túnel de base de Ceneri de 15,4 km de longitud, como puede apreciarse en la figura 1.4.

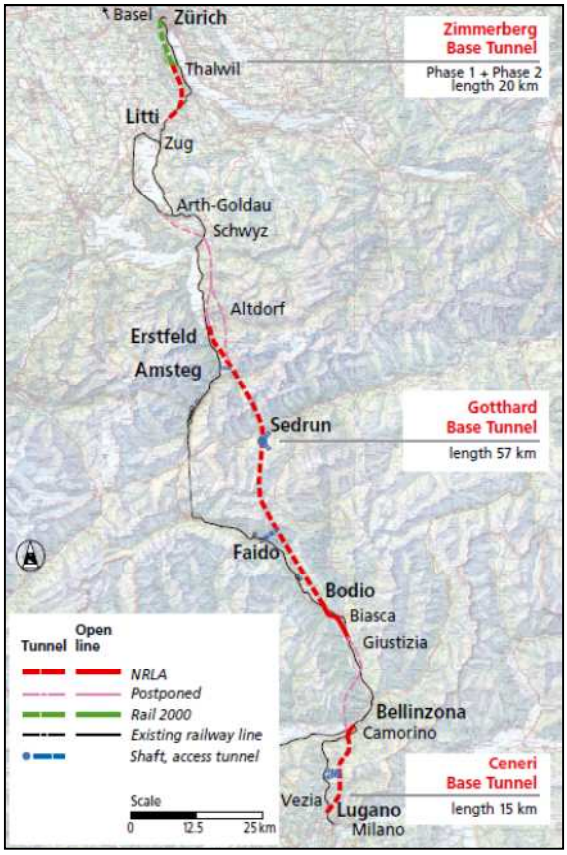

Figura 1.4. Planta del eje de St. Gotthard. Fuente: [2]

La construcción de los tres túneles de base posibilita la creación de una línea ferroviaria ultramoderna, cuyo punto más elevado se encontrará a tan solo 550 metros sobre el nivel del mar, a la altura de la ciudad de Berna, como se puede observar en el perfil longitudinal de la figura 1.5.

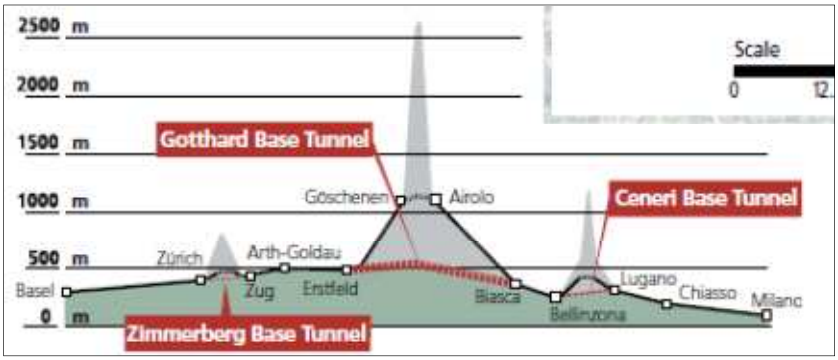

Figura 1.5. Perfil longitudinal del eje de St. Gotthard. Fuente: [2]

- *Túnel de base de Lötschberg*

El túnel de base de Lötschberg es un túnel ferroviario de 34,6 km de longitud que atraviesa los Alpes en el oeste de Suiza y forma parte de la nueva línea Berna-Milán. El túnel une las poblaciones de Frutigen, en el valle de Kandertal y Raron en el valle de Valais, como ilustra la figura 1.6.

Fue abierto al tráfico ferroviario de mercancías el 16 de junio de 2007 y al de pasajeros el 9 de diciembre del mismo año. Con su puesta en servicio, la línea Lötschberg-Simplon constituye el primer eje ferroviario transalpino de gran galibo.

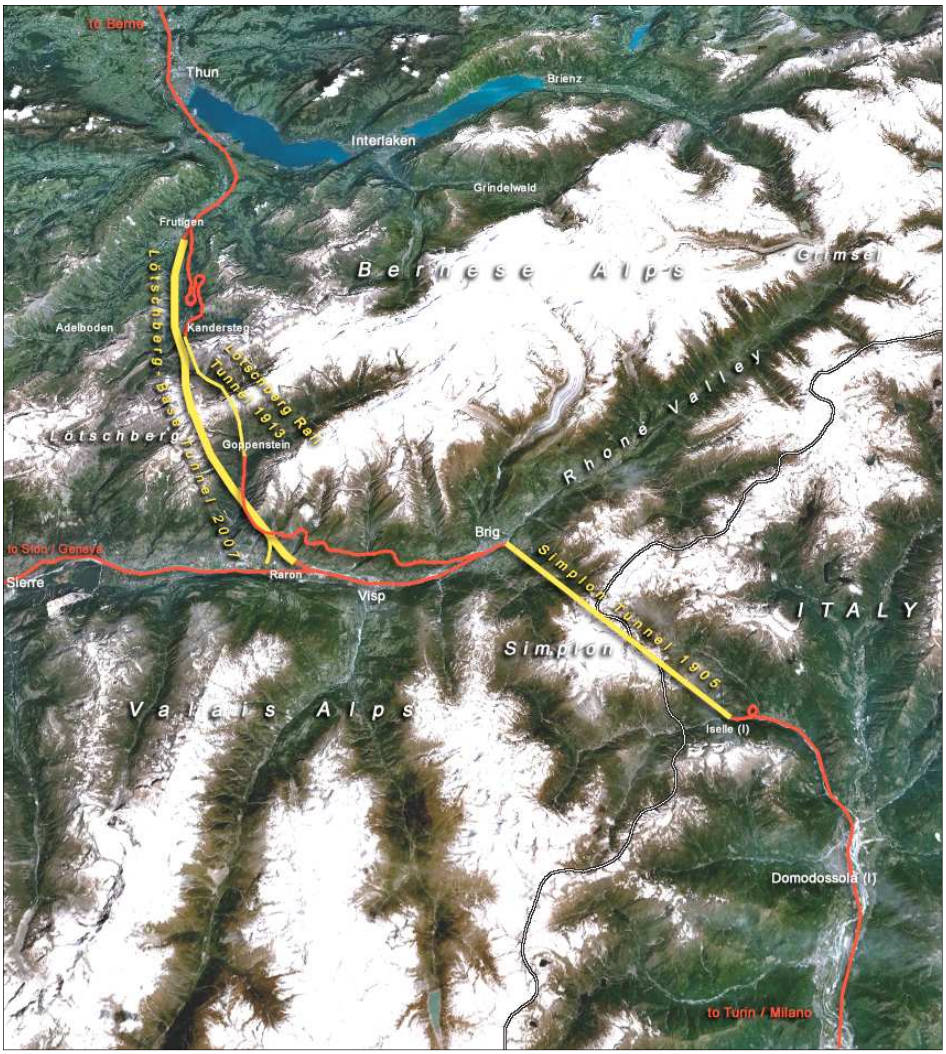

Figura 1.6. Planta de situación del túnel de Lötschberg y del centenario túnel de Simplon I. Fuente: [D]

1.5.2.2. Japón

Japón se convirtió en 1964 en el primer país del mundo en construir una línea férrea de alta velocidad, al inaugurar la línea de Tokaido Shinkansen.

La peculiar forma del país nipón, de contorno alargado y estrecho, ha favorecido que el gobierno del país apueste por la construcción de líneas de alta velocidad que permitan a los japoneses viajar de forma rápida entre los grandes núcleos de población.

Cabe destacar que el conjunto de islas forman una cadena montañosa que ocupa la mayor parte del terreno disponible y que las grandes poblaciones se encuentran asentadas en las planicies cercanas a las costas del Océano Pacífico y del Mar de Japón. Esta configuración orográfica obliga a la construcción de numerosos túneles y viaductos en los trazados de las líneas de alta velocidad y ha llevado a Japón a ser uno de los países con más experiencia en la construcción de túneles ferroviarios de gran longitud.

- *Túnel de Seikan*

El túnel de Seikan, con sus 53,85 km de largo, es el segundo túnel ferroviario más largo del mundo. Une la Prefectura Aomori en la isla japonesa de Honshu y la isla de Hokkaido por el estrecho de Tsugaru, como se puede visualizar en la figura 1.7.

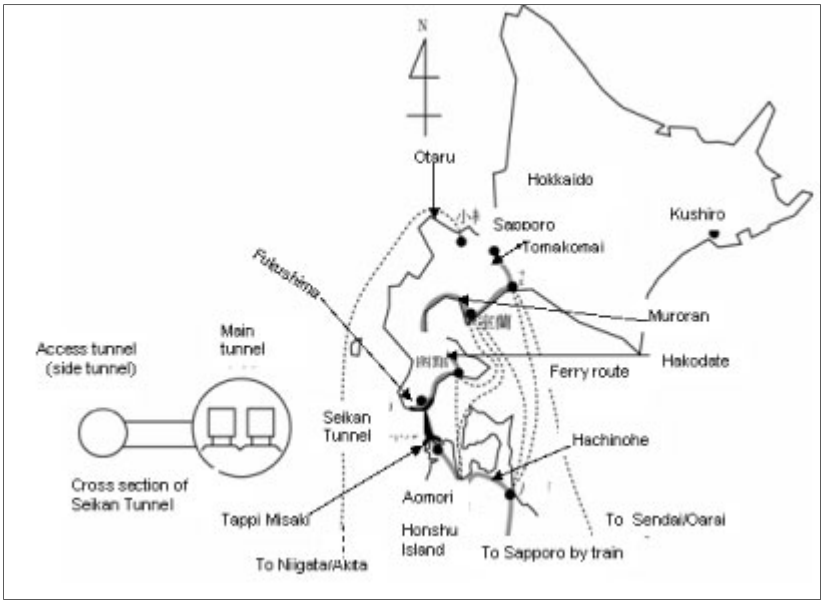

Figura 1.7. Perfil longitudinal del Túnel de Seikan. Fuente: [I]

En 1964 se hundieron cinco ferries en el estrecho de Tsugaru y murieron 1430 pasajeros. Esta tragedia provocó la decisión del gobierno nipón de unir estas dos islas mediante un túnel submarino. Las obras se prolongaron durante 25 años, al no disponer en aquella época de tuneladoras, y concluyeron en el año 1988.

Actualmente, sólo rieles estrechos atraviesan los túneles, pero el proyecto Hokkaido Shinkansen (que empezó a construirse en 2005) incluirá el tendido de rieles duales y conectarán el túnel a la red Shinkansen de alta velocidad.

1.5.2.3. Túnel de base del Brenero

El túnel de base del Brenero es un túnel ferroviario proyectado a través del Paso del Brenero en los Alpes y que conectará la ciudad austríaca de Innsbruck con la localidad italiana de Fortezza. La ruta a través del paso del Brenero es una de las más importantes para atravesar los Alpes y forma parte del corredor transeuropeo Berlín-Múnich-Verona-Roma-Palermo, ilustrado en la figura 1.8.

Figura 1.8. Situación del túnel del Brenero en la nueva línea Berlín-Palermo. Fuente: [B]

El tránsito de pasajeros y de mercancías a través de esta ruta se ha incrementado de manera exponencial generando un "cuello de botella". A raíz de esa situación, fue incluido por el Consejo Europeo de Essen, en diciembre de 1994, entre los 14 proyectos prioritarios de insfraestructuras, constituyendo el denominado proyecto de Alta Velocidad/Transporte Combinado Norte-Sur.

El túnel tendrá una longitud de 55 km, por lo que se convertirá en el segundo túnel ferroviario más largo del mundo una vez concluido (estimación para 2020), solo superado por el túnel de base del Gotardo.

1.5.2.4. Túnel de base de Mont D'Ambin

El túnel de base de Mont D'Ambin es la obra de ingeniería más importante de la nueva línea ferroviaria Lyon-Turín. Esta nueva línea será crucial dentro de la red ferroviaria europea, ya que interconectará 5000 km de líneas adicionales y facilitará la movilidad a unos 250 millones de ciudadanos europeos. Estará situada en el corazón de los ejes que unen Europa del Norte con Europa del Sur (Londres-Amsterdam-Milán) y Europa del Oeste con Europa del Este (Lisboa-Budapest, y a largo plazo, hasta Kiev), tal y como ilustra el mapa de la figura 1.9.

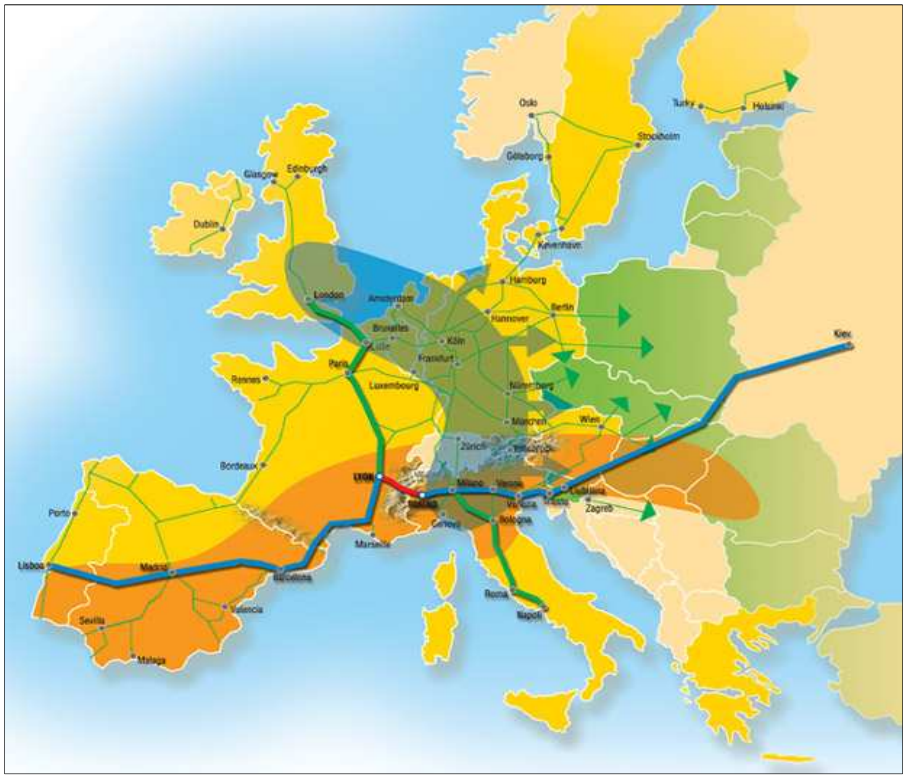

Figura 1.9. Nueva línea Lyon-Turín, pieza clave en la red ferroviaria europea. Fuente: [11]

La nueva conexión ferroviaria permitirá conectar las redes de alta velocidad francesas e italianas, situando Lyon a menos de 1 hora y 45 minutos de Turín y París a poco más de 4 horas de Milán.

El túnel de base tendrá una longitud de 53,1 km, convirtiéndose en el cuarto túnel más largo del mundo, por detrás del túnel de Seikan y unirá las poblaciones de Saint Jean de Maurienne en Saboya (Francia) y Chiusa San Michele, en el valle de Susa (Italia).

1.5.2.5. España

España es uno de los países europeos con una orografía más accidentada. Este hecho explica que en el país haya actualmente más de 1700 túneles de ferrocarril, con un total de 800 km.

La impulsión que está recibiendo la alta velocidad en España desde hace veinte años, está provocando el diseño y la construcción de nuevos túneles ferroviarios de gran longitud como los túneles de Pajares o el Túnel de Guadarrama.

- *Túneles de Guadarrama*

El túnel de Guadarrama constituye la pieza fundamental de la nueva línea ferroviaria de alta velocidad, denominada "Nuevo acceso ferroviario al norte y noroeste de España Madrid-Segovia-Valladolid/Medina del Campo", una de las ramas principales de la Red Básica de Alta Velocidad Española, que viene construyendo el Gestor de Infraestructuras Ferroviarias (GIF), Organismo del Ministerio de Fomento español.

Con sus 28,4 km de longitud, representa el túnel más largo construido en España, el cuarto más largo de Europa y el quinto de todo el mundo a fecha de 2008. Iniciado a finales del año 2002, su entrada en servicio tuvo lugar el 22 de diciembre del 2007 y en su construcción han llegado a trabajar más de 4.000 personas simultáneamente. Es la mayor obra de ingeniería civil que se ha llevado a cabo en España hasta el momento.

Esta infraestructura atraviesa la Sierra de Guadarrama partiendo desde el término municipal de Miraflores de la Sierra (Madrid) a una cota a 998 m y alcanzando una altura máxima de 1.200 m, y volviendo a descender hasta los 1.114 m, ya en las proximidades de la ciudad de Segovia, como puede observarse en la figura 1.10.

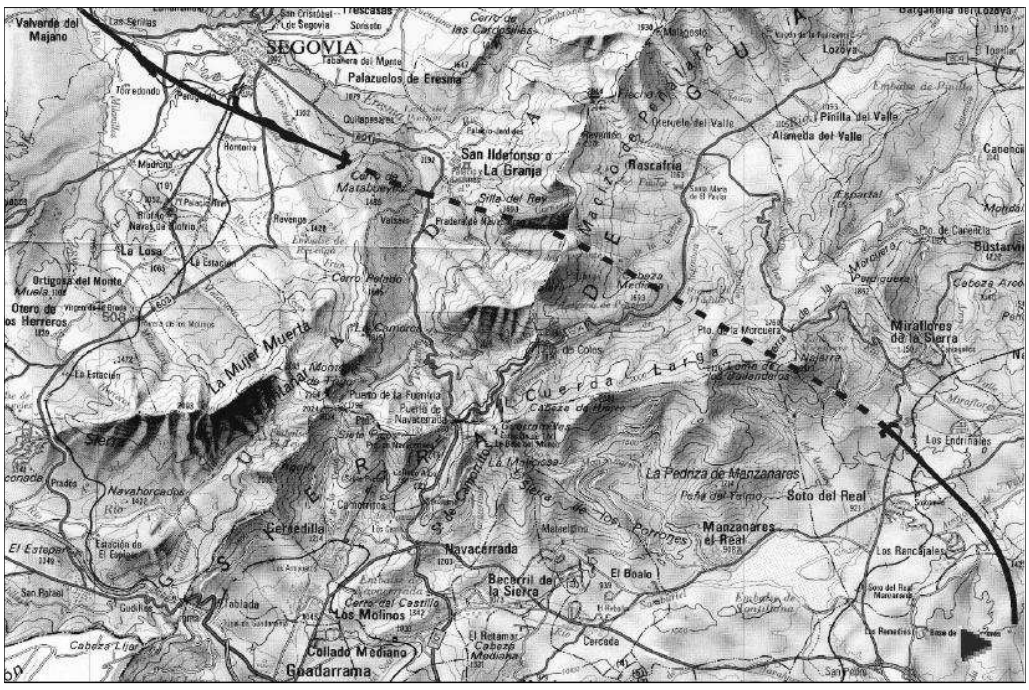

Figura 1.10. Planta de situación del Túnel de Guadarrama. Fuente: [6]

- *Túnel de Pajares*

Los túneles de base de Pajares forman parte de una actuación de mayor embergadura denominada "Variante ferroviaria de Pajares" y permitirán el paso a través de la Cordillera Cantábrica, constituyendo la infraestructura básica de la nueva Línea de Alta Velocidad León-Asturias. Con esta actuación se consiguen superar las dificultades orográficas y morfológicas que ha presentado históricamente el macizo cantábrico para la comunicación ferroviaria entre la meseta castellanoleonesa y el Principado de Asturias.

Este proyecto reducirá la longitud de recorrido existente en la actualidad de 83 a 50 kilómetros, pasando a disponer de doble vía en todo el trazado de la Variante, en lugar de la vía sencilla que existe actualmente. Los túneles de Pajares se componen de dos tubos paralelos, con una longitud de 24,9 kilómetros cada uno. Tal y como ilustra la planta de situación de la figura 1.11, la boca sur del túnel se encuentra ubicada en las proximidades de la Pola de Gordon (León) y la boca norte en la Pola de Lena (Asturias).

Figura 1.11. Planta de situación de los Túneles de Pajares. Fuente: [3]

En 2009 finalizó la excavación de los túneles y Adif sitúa su puesta en servicio para 2012.

1.5.2.6. Túnel del Canal de la Mancha

El túnel del Canal de la Mancha, también conocido como Eurotúnel , tiene una longitud de 50,50 km, 39 de los cuales submarinos y fue inaugurado el 6 de Mayo de 1994, convirtiéndose en el segundo túnel submarino más largo del mundo, por detrás del túnel de Seikan.

El Eurotúnel está formado por tres túneles que conectan Gran Bretaña con el continente europeo desde la terminal de Folkestone, en Kent, hasta la terminal de Coquelles, en Calais. En la figura 1.12 se puede apreciar la situación de las dos bocas del túnel, a ambos lados del Canal de la Mancha.

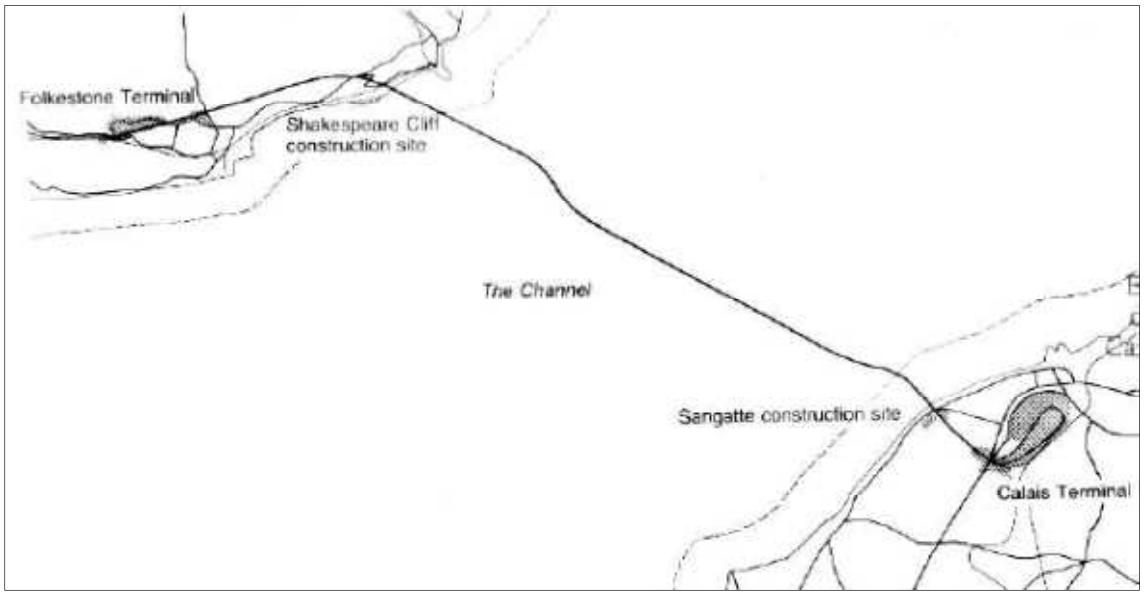

Figura 1.12. Planta de situación del túnel del Canal de la Mancha. Fuente: [8]

El túnel del Canal es la infraestructura privada más importante del mundo. Eurotunnel es la sociedad privada gestora del proyecto y la encargada de gestionar el tráfico ferroviario. El servicio ferroviario ofrecido por esta empresa tiene dos variantes, por un lado el tren de pasajeros Eurostar, y por otro un tren destinado al transporte de vehículos llamado Shuttle. Esta infraestructura ha creado una unión alternativa entre las carreteras francesas y las del Reino Unido, capaz de competir con los tradicionales ferries.

2. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES EN CUANTO A CRITERIOS DE DISEÑO

2.1. DISEÑO DEL TRAZADO

2.1.1. Condicionantes del trazado

Los túneles ferroviarios de gran longitud (a diferencia de los túneles cortos) suelen ser la obra civil de mayor importancia, tanto económica como técnicamente, dentro del conjunto de la obra de la línea a la que pertenecen. Es por este motivo que su trazado condiciona al trazado de la línea y no al revés, como ocurre con los túneles cortos.

En el diseño del trazado de un túnel ferroviario de gran longitud se deben tener en cuenta multitud de factores. Los de mayor relevancia se presentan a continuación:

- Es importante minimizar, en la medida de lo posible, la longitud de túnel continuo. Las dos importantes ventajas que se derivan de este hecho son, por un lado, la mejora de la seguridad en la construcción y explotación del túnel acortando la distancia a zona segura, y por otro, la reducción de plazo que supone el poder atacar el túnel por diversos frentes.
- Se debe minimizar la afección a zonas de alta riqueza medioambiental. Este aspecto es especialmente crítico durante la fase de construcción, debido a la enorme superficie de ocupación, a los elevadísimos volúmenes de material extraídos y al gran volumen de tráfico de vehículos que requiere una obra de estas características. Cabe destacar que en fase de explotación los túneles son de las tipologías de obra civil que ocasionan un impacto ambiental menor.
- Se debe evitar, dentro de lo posible, tanto los puntos bajos como los puntos altos. Los primeros ocasionan problemas de acumulación de agua y los segundos presentan problemas de ventilación.
- Se debe estudiar muy a fondo la mejor ubicación para las bocas del túnel, evitando cualquier tipo de riesgo.

2.1.2. Parámetros del trazado

Los trazados de los túneles analizados en el presente estudio, excepto el túnel del Canal de la Mancha, se proyectaron para la circulación de trenes de alta velocidad. Para que los trenes puedan circular a elevadas velocidades, los parámetros del trazado de los túneles deben respetar unos valores exigentes en cuanto a radios mínimos y pendientes máximas.

El radio en curva se limita para evitar o reducir los efectos negativos de los tres fenómenos siguientes que dependen de la velocidad:

- Descarrile o vuelco del vehículo ferroviario.
- Fuerza transversal que ejerce el vehículo sobre la vía y que tiende a desplazarla.
- Las aceleraciones laterales de los vehículos se transmiten al pasajero afectando negativamente al confort.

A continuación se presentan los parámetros del trazado más significativos de los túneles objeto de análisis:

CARACTERÍSTICAS DEL TRAZADO DE LOS TÚNELES ESTUDIADOS					
Túnel	Velocidad máxima trenes viajeros (km/h)	Velocidad máxima trenes mercancías (km/h)	Radio mínimo (m)	Pendiente máxima (‰)	Cota máxima (m s.n.m)
St. Gotthard	250	160	3000	8	550
Brennero	250	120	-	6,7	794
Seikan	210	-	6500	12	-240
Mont D'Ambin	250	120	3200	12,5	750
Eurotúnel	160	120	4200	11	-172
Lötschberg	250	140	3200	13	828
Guadarrama	350	-	8500	15	1200
Pajares	350	160	3550	16,8	1139

Tabla 2.1. Características del trazado de los túneles estudiados.
Fuente: elaboración propia

Se puede observar como los túneles presentan unos radios mínimos muy generosos. Este hecho es doblemente beneficioso, ya que permite la circulación a velocidades elevadas sin la necesidad de recurrir a grandes peraltes, lo cual favorece enormemente la buena conservación de la plataforma ferroviaria, reduciendo los costes de mantenimiento.

La tabla 2.1 muestra cómo las pendientes máximas responden en general a criterios de tráfico mixto, respetando las Recomendaciones para el Proyecto de Plataforma de GIF que recomiendan valores no superiores a las 15 milésimas.

Es importante destacar que la velocidad máxima permitida por trazado puede verse reducida notablemente debido a los fenómenos aerodinámicos que aparecen al circular un tren por un túnel de gran longitud. Consecuentemente, se aconseja analizar las limitaciones ocasionadas por este último fenómeno en los túneles de gran longitud para evitar sobredimensionar el radio mínimo en curva.

2.2. DISEÑO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

2.2.1. Introducción

El análisis de los problemas aerodinámicos en túneles se remonta a los años 60 del siglo pasado, con ocasión de la construcción de la línea de alta velocidad entre Tokio y Osaka. Se constató que al entrar el tren en el túnel a una determinada velocidad, los viajeros pueden sentir molestias en los oídos a causa del incremento de presión que se produce en el interior del tren. Este hecho pasó a ser el principal criterio a tener en cuenta a la hora de diseñar la sección transversal de los túneles ferroviarios.

Recientemente se ha descubierto que para longitudes de túnel superiores a 5-10 km, la fricción tren-aire-túnel absorbe gran parte de la potencia del tren y la velocidad disminuye enormemente si el diámetro del túnel es demasiado pequeño.

Se recomienda dirigir los criterios de diseño de la sección transversal de los túneles largos hacia la reducción de la resistencia, por ser más restrictivo que el criterio de confort y con el objeto de mantener en lo posible la velocidad, lo que además permitirá el paso de cargas de mayor gálibo.

2.2.2. Principales fenómenos que se producen al pasar un tren por un túnel

2.2.2.1. Entrada en el túnel: Ondas compresivas y expansivas

En el proceso de la entrada del tren en el túnel se genera una onda compleja compresiva-expansiva-compresiva que se transmite a la velocidad del sonido a lo largo del túnel y se refleja cambiando de carácter en el portal del túnel opuesto al de entrada.

La máxima presión alcanzada depende de:

- El coeficiente de bloqueo: relación entre la sección transversal del tren y la del túnel. Cuanto menor es el coeficiente de bloqueo, menor es el incremento de presión que se produce en el interior del túnel.
- La velocidad del tren: A mayor velocidad, mayor incremento de presión.
- Longitud del tren: Cuanto mayor es la longitud del tren y la rugosidad de su superficie, mayor es la resistencia al avance y la potencia necesaria para mantener la velocidad en el interior del túnel.
- La forma de la cabeza de la locomotora: Influye en menor medida, pero resulta importante diseñar las cabezas de las locomotoras optimizando su resistencia aerodinámica.

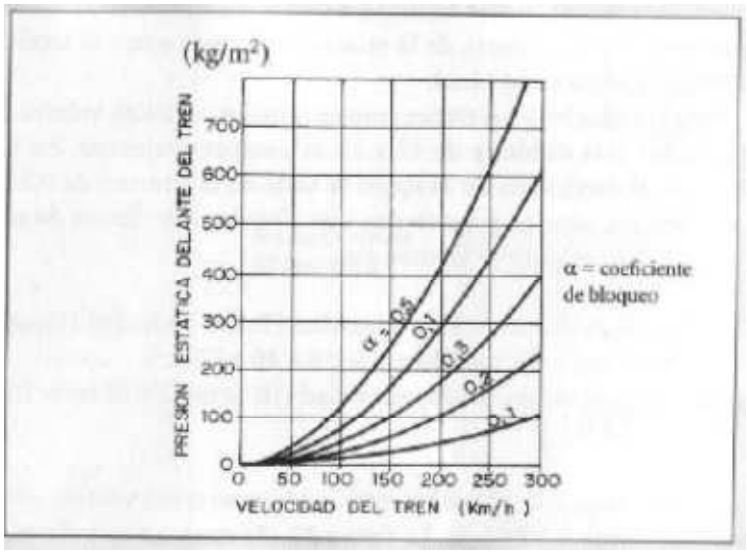

Figura 2.1. Variación de presión delante del tren en función de la velocidad de circulación y el coeficiente de bloqueo. Fuente: [9]

La mínima presión alcanzada en la fase expansiva depende de la brusquedad de la fase de introducción en el túnel de la locomotora de cola del tren. Entre otros factores, el espesor de la capa límite al final del tren, influye en gran medida en la presión mínima alcanzada en esta fase.

La sobrepresión residual por delante del tren, alcanzada una vez que se han homogeneizado las condiciones en el portal de entrada y se ha realizado la mezcla turbulenta de la estela del tren, depende de la propia resistencia aerodinámica del tren en el interior del túnel.

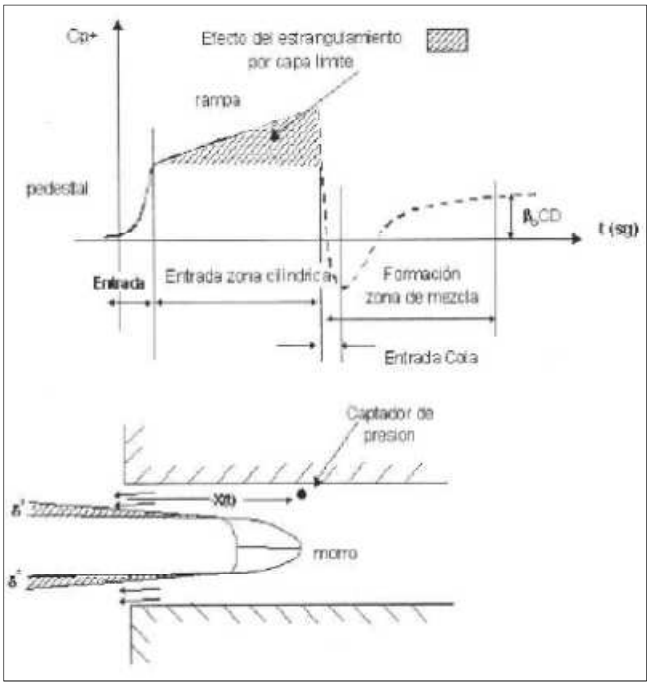

Figura 2.2. Registro de presión a la altura del morro de la locomotora de cabeza. Generación de la onda compresiva-expansiva-compresiva. Fuente: [10]

2.2.2.2. Presión en los laterales del tren en el túnel

La presión en el exterior del lateral del tren disminuye al introducirse el tren en el túnel, debido al efecto Venturi que conlleva el incremento de velocidad de paso de la corriente por la sección anular entre tren y túnel debido a la disminución del área de paso libre. La presión exterior va disminuyendo desde el primer vagón hasta el último.

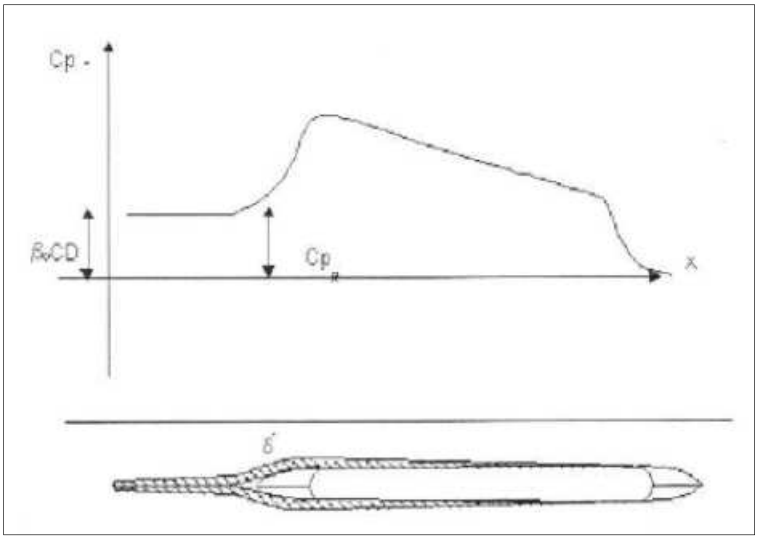

Figura 2.3. Presiones a lo largo del tren en el interior del túnel en el mismo instante de tiempo. Depresión producida por el efecto Venturi. Fuente: [10]

La combinación de este efecto con el de propagación de las ondas de presión, generadas con la entrada del tren en el túnel determina la evolución con el tiempo de la presión en el exterior del tren, durante todo su recorrido interior. En el exterior de un vagón cualquiera, la presión inicialmente asciende, hasta que el coche es adelantado por la onda expansiva producida con la introducción de la locomotora de cola del tren. A partir de ese momento, y hasta otros cruces con ondas reflejadas, la presión en el exterior del coche es la resultante del efecto Venturi, junto con la sobrepresión existente en dicho punto respecto de la presión atmosférica exterior.

Por otro lado, con el objeto de diluir en un tiempo mayor el salto de las presiones en el exterior del lateral del tren, así como, con el objeto de reducir, en la medida de lo posible, la intensidad del pico de sobrepresión de la onda que se lanza hacia el interior del túnel, en el proceso de la entrada, es aconsejable el diseño e instalación de dispositivos amortiguadores en la entrada y en la salida del túnel. Cabe destacar que la aplicación de estos dispositivos está justificada para los túneles cortos, ya que los túneles de gran longitud se diseñan, por razones de fricción, con diámetros considerablemente mayores, cumpliendo los límites de variación de presión.

2.2.2.3. Circulación del tren por el túnel: resistencia aerodinámica

Durante la circulación por el interior del túnel se produce un incremento de la resistencia aerodinámica que se opone al movimiento, respecto de la existente a la misma velocidad del tren en su movimiento fuera del túnel. En la resistencia aerodinámica del tren influye la velocidad inducida por el propio tren, al aire circundante a lo largo del túnel en el sentido del movimiento.

La resistencia aerodinámica durante la circulación interior es máxima entre la fase de entrada y el encuentro con la onda rebotada en extremo opuesto del túnel.

Es intuitivo que la rugosidad del revestimiento del túnel también debe jugar un cierto papel en el incremento de la resistencia de avance, en consecuencia se ha establecido el criterio de revestir los túneles con independencia de la necesidad estructural existente.

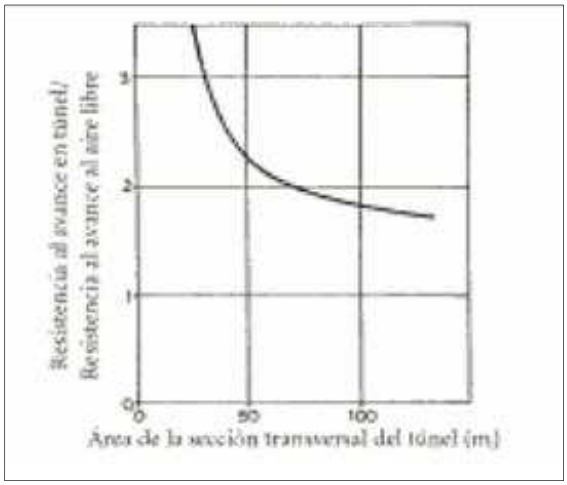

Figura 2.4. Influencia del área de la sección transversal en la resistencia al avance. Fuente: [9]

2.2.2.4. Superposición de efectos en túneles de vía doble

Los fenómenos descritos anteriormente se producen por cada tren que entra en el túnel. Naturalmente, pueden sumarse unos con otros y aumentar sus efectos en los túneles de vía doble cuando tiene lugar un cruce de trenes. En este caso la curva de presión se caracteriza por una caída brusca de la presión, como la que tiene lugar al paso de un vehículo por un punto fijo, seguida de una caída de presión a causa del rozamiento y, finalmente, de un incremento de presión después del paso de la cola del tren.

Las mayores caídas de presión se producen cuando uno de los trenes se encuentra detenido cerca de la entrada del túnel, de forma que la onda provocada por la entrada del tren A se refleje en el tren B y alcance la cabeza del tren A, antes que la onda provocada por la entrada de la cola del tren A alcance la cabeza de éste.

Cabe destacar que la problemática de la superposición de efectos por cruce de trenes no se suele dar en los túneles de gran longitud, debido a que la mayoría de ellos están formados por dos secciones independientes.

2.2.3. Criterios de diseño para la selección del diámetro del túnel

La selección del diámetro de un túnel en fase de diseño determina los volúmenes de la excavación y del revestimiento, es decir, el coste del túnel, por lo que su elección va a verse afectada, por un lado (acotación máxima) por consideraciones económicas y de factibilidad técnica, y por otro lado (acotación mínima) por su efecto sobre los fenómenos físicos indeseables que aparecen ocasionados con el tránsito del tren por el interior del túnel.

En cuanto a los fenómenos fluidodinámicos, la mínima sección libre del túnel resultará determinada a partir de las dos siguientes consideraciones:

2.2.3.1. Criterio de confort

El criterio del confort de los pasajeros determina una cota mínima para la sección del túnel, que es una función de la sección y velocidad del tren, y de la longitud del propio túnel, así como el grado de estanqueidad de los coches. En el caso de coches completamente estancos, las limitaciones podrían provenir desde el punto de vista estructural del propio tren: presiones en las ventanillas o, por ejemplo, fenómenos de fatiga de los materiales.

La medida del confort se establece sobre la percepción fisiológica y subjetiva del desagrado provocado por la presencia de los cambios de presión y su duración. La expresión al uso, resultado de estudios estadísticos, es de la forma siguiente:

$$\text{displacer} = a + b \cdot P + c \cdot G + d \cdot T + e \cdot S \qquad \textbf{(2.1)}$$

P es el cambio de la presión
G el gradiente temporal de la presión
T la duración del cambio
S el signo de la variación de presión

Los cambios de presión en el exterior del tren, asociados a las ondas, se transmiten al interior de los coches a través de las fugas, y en particular del sistema de acondicionamiento.

$$p_{int} = p_{ext}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \qquad \textbf{(2.2)}$$

El Criterio de Confort se establece fijando el par de valores (P, T). Una vez fijado el criterio de confort, el diámetro del túnel se estima a partir de la velocidad de paso del tren por el túnel.

Debe señalarse tanto la subjetividad del procedimiento, como la incertidumbre sobre la estanqueidad de un vehículo determinado. Es evidente por tanto, que estos criterios deben aplicarse de un modo conservador.

2.2.3.2. Criterio de salud

Es un hecho que la mejora de los sistemas de estanqueidad de los trenes podría conducir a aceptar elevados valores de variaciones de presión en el exterior de los trenes de viajeros al circular por el interior de los túneles. Los citados sistemas de estanqueidad, filtrando adecuadamente las citadas presiones, lograrían que el confort del viajero no se viese afectado.

Es indudable que debe garantizarse que, ante cualquier situación durante la explotación ferroviaria, la salud, más que el confort del viajero, no se vea afectada. En consecuencia, se establece el criterio de que la sección de un túnel ha de ser tal que para la máxima velocidad de circulación programada y en previsión de que los sistemas de estanqueidad puedan o no funcionar, el viajero no experimente variaciones de presión superiores a 10 Kpa. La aplicación práctica de este criterio ha conducido al establecimiento de gráficos como el indicado en la figura 2.5, para distintas longitudes de túneles y velocidades de circulación.

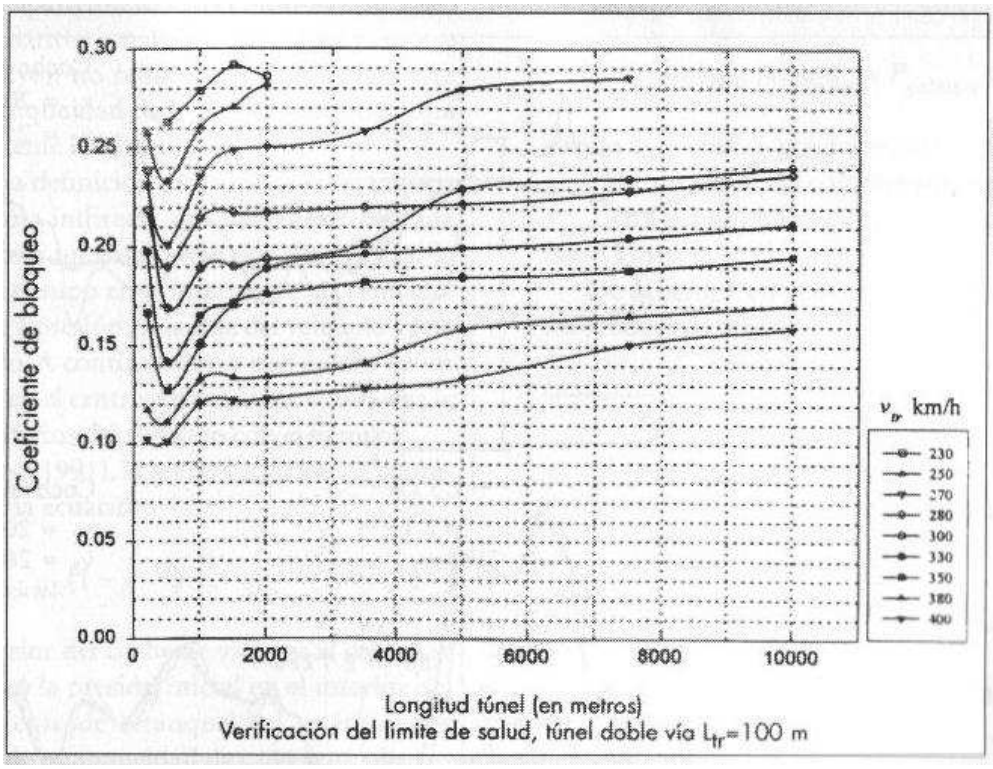

Figura 2.5. Ábaco para dimensionar la sección transversal de un túnel por criterio de salud. Fuente: [9]

2.2.3.3. Incremento de la resistencia que se opone al avance del tren

La razón de las resistencias en el interior del túnel y a cielo abierto se llama factor del túnel y, para la misma rugosidad del revestimiento, depende principalmente de la relación de áreas de las secciones transversales del tren y del túnel (coeficiente de

bloqueo). Asimismo depende de la longitud del tren y de la velocidad del mismo, y secundariamente de otros factores concretos como la forma de las locomotoras del tren.

La resistencia al avance en el exterior del túnel viene generalmente expresada por la formula de Gawthorpe:

$$R = A + B \cdot V + C \cdot V^2 \qquad \textbf{(2.3)}$$

Donde el coeficiente C se corresponde con el coeficiente de resistencia aerodinámica C_D de la siguiente forma:

$$C = 0{,}5 \cdot \rho_0 \cdot A_0 \cdot \mathrm{C_D} \qquad \textbf{(2.4)}$$

Dentro del túnel, la estela confinada juega un papel importante. La correspondiente expresión para el coeficiente de resistencia es:

$$C_D = \left[2\frac{\Delta_2}{A_0} + B_0\left(\frac{\Delta_1}{A_0}\right)^2\right]\left(\frac{1-\frac{U_T}{U_0}}{1-B_0\frac{\Delta_1}{A_0}}\right)^2 \qquad \textbf{(2.5)}$$

con:

Δ_1 y Δ_2	espesores calculados o medidos en la estela próxima dentro del túnel
B_0	coeficiente de bloqueo
A_0	área de la sección transversal del tren
U_T	velocidad media inducida en el túnel aguas arriba del tren
U_0	velocidad del tren

El factor de túnel aerodinámico queda determinado como el cociente entre los coeficientes de resistencia aerodinámica del túnel y a cielo abierto. Este último se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_D = 2\frac{\Delta_2}{A_0} \qquad \textbf{(2.2)}$$

Si se quiere mantener la velocidad del tren, la tracción disponible fija el factor del túnel y a partir de éste se otiene la sección libre mínima.

2.2.4. Efecto sobre la longitud del túnel

2.2.4.1. Túneles muy cortos

En los túneles con una relación entre la longitud del túnel y la del tren de tan solo unos cientos de metros, el incremento de resistencia interior no tiene ninguna importancia dado que los trenes disponen de una gran reserva energética en su masa inercial. Sin embargo, el sistema de ondas generado por las reflexiones en las bocas de entrada y

salida del túnel, de la onda percusiva producida en la entrada, puede provocar rápidas variaciones de la presión en el interior de los coches no estancos, que podrían superar los límites normativos que atienden al confort de los pasajeros. Esta es la razón de que las variaciones de presión alcanzadas durante el tránsito, acoten la sección mínima de este tipo de túneles para cumplir la normativa correspondiente.

En este tipo de túneles cortos (menos de 1 Km) podría producirse el fenómeno de la superposición temporal de las ondas, produciendo la suma de las dos ondas expansivas coincidentes, alcanzando una presión muy baja. A 100 Km/h la coincidencia aparece para longitudes de túnel aproximadamente seis veces la longitud del tren. A 200 Km/h la longitud del túnel crítica es de tres veces la longitud del tren y a 300 Km/h dos veces su longitud.

2.2.4.2. Túneles largos

En los túneles de longitudes de hasta 5 Km aproximadamente, tienen que tenerse en consideración tanto los fenómenos asociados con la transmisión de las ondas como los debidos al incremento de resistencia del tren por la fricción.

2.2.4.3. Túneles muy largos

En los túneles de longitudes superiores a los 10 km (en los que se centra este estudio), el tiempo de tránsito es suficientemente alto como para que la reserva inercial del tren no sea suficiente para el mantenimiento de su velocidad máxima, por lo que el incremento de la resistencia aerodinámica pasa a ser el fenómeno fundamental y en el que se debe centrar el diseño de la sección transversal de este tipo de túneles.

2.2.5. Comparativa y análisis de las secciones transversales de los túneles estudiados

En la tabla 2.2 se muestran las características más importantes de las secciones transversales de los 8 túneles analizados en el presente estudio:

CARACTERÍSTICAS DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE LOS TÚNELES ESTUDIADOS						
Túnel	Velocidad máxima (km/h)	Vía	Diámetro (m)	Sección útil (m2)	Sección del tren (m2)	Coef. bloqueo
St. Gotthard	250	Vía única	8,5	52	10 (ETR)	0.19
Brenner	250	Vía única	8,1	46	10 (ETR)	0.22
Seikan	210	Vía doble	9,6	74	12 (HIKARI)	0.16
Mont D'Ambin	250	Vía única	8,4	43	9 (TGV)	0.21
Eurotúnel	160	Vía única	7,6	45	9 (TGV)	0.20
Lötschberg	250	Vía única	8,5	52	10 (ETR)	0.19
Guadarrama	350	Vía única	8,5	52	9 (AVE)	0.17
Pajares	350	Vía única	8,5	52	9 (AVE)	0.17

Tabla 2.2. Características de las secciones transversales de los túneles estudiados.
Fuente: elaboración propia

Se puede observar que la mayoría de túneles tienen un diámetro entorno a los 8,5 metros, por lo que se deduce que no se ha tenido en consideración el criterio de resistencia aerodinámica a la hora de su diseño, ya que este último criterio aconseja diámetros entorno a los 10 metros.

Recientes estudios demuestran que diámetros del orden de los 8,5 metros resultan insuficientes para mantener la velocidad de proyecto en los túneles de gran longitud, debido al efecto de la fricción del aire. Para estos diámetros, el factor del túnel se dobla para un AVE actual y se triplica si la sección transversal se amplía en un 50% como en un AVE de dos pisos. [10]

En estos estudios se modelizó la actuación de un AVE de características reales, y de otro tren, geométricamente semejante, pero de sección ampliada hasta los 12,6 m^2 (característica de los más modernos trenes Shinkansen de simple cubierta), en túneles de 25 km de longitud y con diámetros interiores libres de 8,5 m, 10 m y 11,5 m.

En la tabla 2.3 se muestran los resultados del estudio en cuestión.

Velocidad del tren en el túnel km/h . Pendiente 0.5%				
Diámetro del túnel	**8.5 m**	**10 m**	**11.5 m**	**Infinito (aire libre)**
AVE de 1 piso				
Potencia maxima continua	243	268	285	310
Potencia máxima absoluta	276	302	318	342
AVE de 2 pisos				
Potencia maxima continua	171	206	226	265
Potencia máxima absoluta	204	240	262	304
Velocidad del tren en el túnel km/h . Pendiente 1.0%				
Diámetro del túnel	**8.5 m**	**10 m**	**11.5 m**	**Infinito (aire libre)**
AVE de 1 piso				
Potencia maxima continua	217	240	253	274
Potencia máxima absoluta	255	279	293	315
AVE de 2 pisos				
Potencia maxima continua	137	165	180	213
Potencia máxima absoluta	177	208	228	264
Velocidad del tren en el túnel km/h . Pendiente 1.5%				
Diámetro del túnel	**8.5 m**	**10 m**	**11.5 m**	**Infinito (aire libre)**
AVE de 1 piso				
Potencia maxima continua	186	206	217	236
Potencia máxima absoluta	232	254	266	286
AVE de 2 pisos				
Potencia maxima continua	84	105	122	143
Potencia máxima absoluta	145	172	188	217

Tabla 2.3. Velocidades de paso máximas del AVE por un túnel de 25 km, para distintos diámetros y pendientes. Fuente: [10]

Se observa que para la potencia máxima que el tren puede dar de forma continua, la velocidad en el túnel no superará los 240 km/h en túneles de 8,5 m de diámetro interno. Los AVE de dos pisos no superarán los 170 km/h para un 0,5 % de pendiente y si esta aumenta hasta el 1% la velocidad baja hasta los 137 km/h.

Cabe destacar que, debido a la resistencia aerodinámica, el AVE nunca podrá circular por el interior de un túnel largo, de pendiente no negativa, a la velocidad de 350 km/h (velocidad de proyecto en los túneles de Pajares y Guadarrama), ya que para ello requeriría de un diámetro interior libre superior a los 14 m.

Los estudios realizados hasta la fecha sobre la aerodinámica de los túneles largos ponen de manifiesto la necesidad de diseñar estos túneles con un diámetro interior libre de 10,75 m, para que un AVE pueda circular a 300 km/h con una pendiente del 0,5 %, disponiéndose de un pequeño margen de reserva en el régimen de tracción máxima continua del tren.

3. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES EN CUANTO A CRITERIOS CONSTRUCTIVOS

3.1. CONDICIONANTES GEOMECÁNICOS EN LOS GRANDES TÚNELES DE BASE

Los túneles de base de gran longitud se internan en el corazón del macizo montañoso, en zonas absolutamente desconocidas de las que no se dispone, habitualmente, de ningún dato que pueda ayudar en la fase de diseño de la infraestructura. De esta forma, las incertidumbres geológicas aumentan cuanto mayor es la profundidad a la que se desarrolla el trazado del túnel; de igual modo, a mayor longitud del túnel, mayor es la probabilidad de encontrar zonas potencialmente problemáticas o fenómenos no previstos inicialmente. El desarrollo de los trabajos de excavación de túneles de estas características debe afrontar situaciones adversas, tales como:

- Tensiones internas muy elevadas, caracterizadas por parámetros muy complicados de estimar por medio de investigación, especialmente las tensiones horizontales.
- Deformaciones plásticas y relajamiento del macizo de elevado desarrollo, como consecuencia de las tensiones internas del macizo.
- Auto-estallido de rocas de extrema dureza (rock-bursting)
- Elevada presión del agua existente en el interior del macizo y elevados gradientes de circulación hacia el interior del túnel una vez efectuada la excavación. Afección derivada sobre el sistema hidrológico del macizo montañoso y sobre el equilibrio hidrológico en superficie.
- Zonas de contacto, fallas, fracturas, cabalgamientos. Suponen zonas débiles con material muy alterado, con un comportamiento más parecido a un suelo que al macizo rocoso. Dichas zonas además suelen llevar asociada la presencia de agua a elevadas presiones.
- Fallas activas tectónicamente, con posibles desplazamientos de origen sísmico.
- Elevadas temperaturas en el propio material a excavar.

Las campañas de investigación serán tanto más costosas cuanto mayor sea la longitud del túnel y la profundidad a la que discurra. Pero estas campañas son absolutamente necesarias para reducir las incertidumbres relacionadas con los parámetros geomecánicos del macizo que se pretende excavar.

En relación a los medios constructivos, existe una tendencia clara en aumentar el uso de las máquinas de excavación integral a sección completa, a pesar de que dichas máquinas pueden sufrir graves problemas si trabajan bajo determinadas condiciones geológicas, pues no es factible, a día de hoy, la tuneladora universal capaz de adaptarse a cualquier situación geomecánica (los autores consideran, además, que esta situación queda aún muy lejana en el futuro progreso tecnológico de las máquinas). De esta forma, las tuneladoras de roca se enfrentan a graves problemas de rendimiento o incluso a la completa paralización si ocurre uno de los siguientes fenómenos:

- Deformaciones plásticas severas y veloces. Existen ejemplos de atrape de tuneladoras en terrenos muy deformables, donde ha sido necesario incluso abandonar este método de excavación.
- Zonas muy fracturadas con presencia de agua. El principal problema de una red de fracturación intensa aparece cuando la excavación pasa debajo de los valles fluviales, debido a que la fracturación puede conectar hidráulicamente el río y el túnel, provocando la entrada de grandes caudales de agua en el túnel.
- Zonas de fallas arenizadas. La presencia de material arenizado suele dar muchos problemas a las TBM's. Si hay presencia de agua, el problema se agrava, debido a que el material forma una especie de masa plástica que entorpece el trabajo de los cortadores y puede incluso llegar a bloquear la rueda de corte.

Algunas de las posibles soluciones a estos problemas de aplicación en las TBM's son:

- Si se conoce de antemano la posibilidad de hallar alguna zona en la que se pueda quedar atrapada la tuneladora, el escudo debe ser lo más corto posible, para disminuir la superficie potencial de atrapamiento.
- Ante la presencia de terrenos muy deformables, la fuerza de empuje total de las máquinas se ha de incrementar para compensar las posibles pérdidas por rozamiento.
- La incorporación a la TBM de la posibilidad de desplazar independientemente el eje de la rueda de corte, permite realizar una sobreexcavación extra con los cortadores perimetrales en caso de atrapamiento, y así facilitar el movimiento de la TBM.
- La incorporación de sistemas de sondas que permitan realizar perforaciones en el frente de excavación y en todo el perímetro del escudo, permite detectar las zonas más peligrosas y planificar su excavación con anterioridad.

3.2. MÉTODOS CONSTRUCTIVOS

3.2.1. Excavación con máquinas integrales (TBM)

Casi todos los grandes túneles ejecutados en la última década están siendo construidos en su mayor parte por medio de máquinas integrales (Tunnel Boring Machines), capaces de excavar el túnel a sección completa con rendimientos realmente elevados que permiten reducir los largos plazos requeridos para la construcción de estas grandes obras. En la figura 3.1 se ilustra la evolución del empleo de este tipo de máquinas en las últimas décadas.

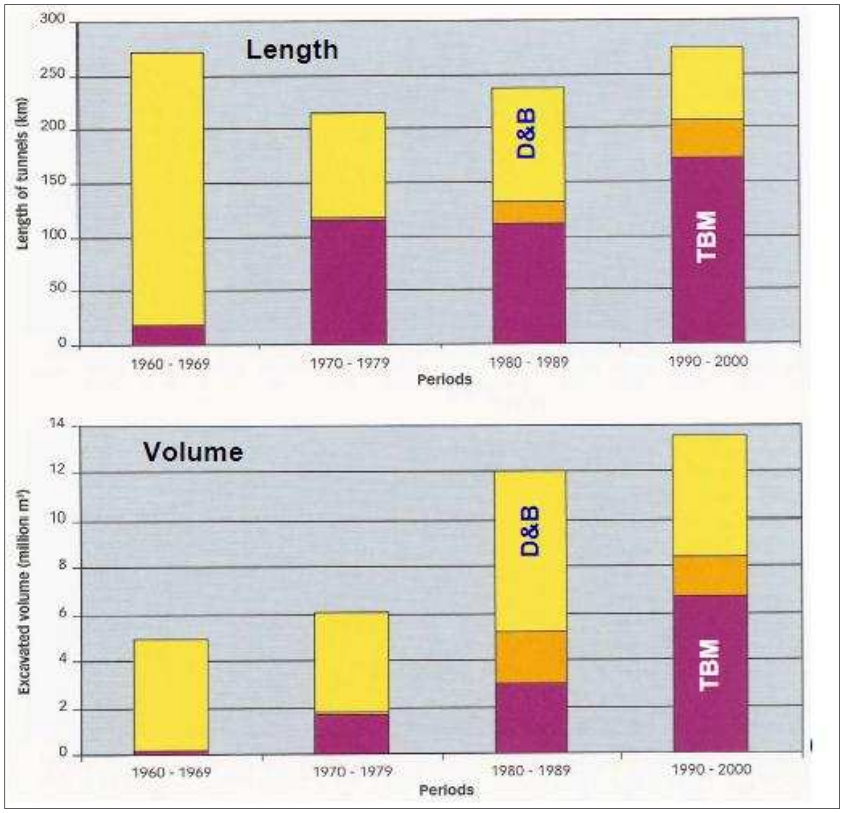

Figura 3.1. Evolución del empleo de TBMs en Suiza. Fuente: [19]

Estas máquinas arrastran tras la cabeza de corte una serie de plataformas, denominada back-up, que además de permitir la colocación inmediata del sostenimiento, alberga otros equipos secundarios (ventilación, evacuación del material excavado, guiado de la maquina, depósitos de mortero, colocación de vía para el acceso l frente, etc.).

Para poder amortizar la elevada inversión, tanto inicial como de mantenimiento, que requiere la excavación con tuneladoras, los túneles a excavar deben tener al menos dos kilómetros de longitud. Los grandes túneles ferroviarios presentan longitudes de más de 20 km, por lo que se pueden amortizar varias TBM para poder atacar por varios frentes simultáneamente.

En cuanto a la geometría del túnel, el uso de estas maquinas requiere que la sección transversal sea circular, que en el trazado en planta el radio de curvatura mínimo no sea inferior a 300 metros y que en el trazado en alzado, las pendientes máximas no superen el 4%. Estas limitaciones no resultan problemáticas para los túneles ferroviarios de alta velocidad, ya que sus trazados presentan parámetros mucho más restrictivos.

Otras limitaciones se refieren a la geología y la geotecnia de los terrenos a atravesar. Así, en terrenos excesivamente blandos o con problemas de sostenimientos podrían desaconsejar el sistema, ya que se podría encarecer considerablemente. La alta abrasividad de algunas rocas, así como los contenidos elevados de sílice pueden producir elevados desgastes en los cortadores y cangilones de cabeza, llegando a descartar la excavación con TBM por problemas puramente económicos.

Estas máquinas se dividen en dos grandes grupos: topos y escudos. Ambos difieren de forma importante según el tipo o suelo que sea necesario excavar, así como de las necesidades de sostenimiento o revestimiento que requiera cada tipo de terreno.

3.2.1.1. Topos

Los topos se diseñan principalmente para poder excavar rocas duras y medias, sin grandes necesidades de soporte inicial.

Constan de una cabeza giratoria, dotada de cortadores, que se acciona mediante motores eléctricos con dos velocidades de giro y que avanza en cada ciclo mediante el empuje de unos cilindros de empuje (2 o 4), que reaccionan sobre las zapatas de los grippers, los cuales a su vez están anclados contra la pared del túnel. En la figura 3.2 se puede observar la cabeza de uno de los topos empleados en el túnel de base del Gotardo.

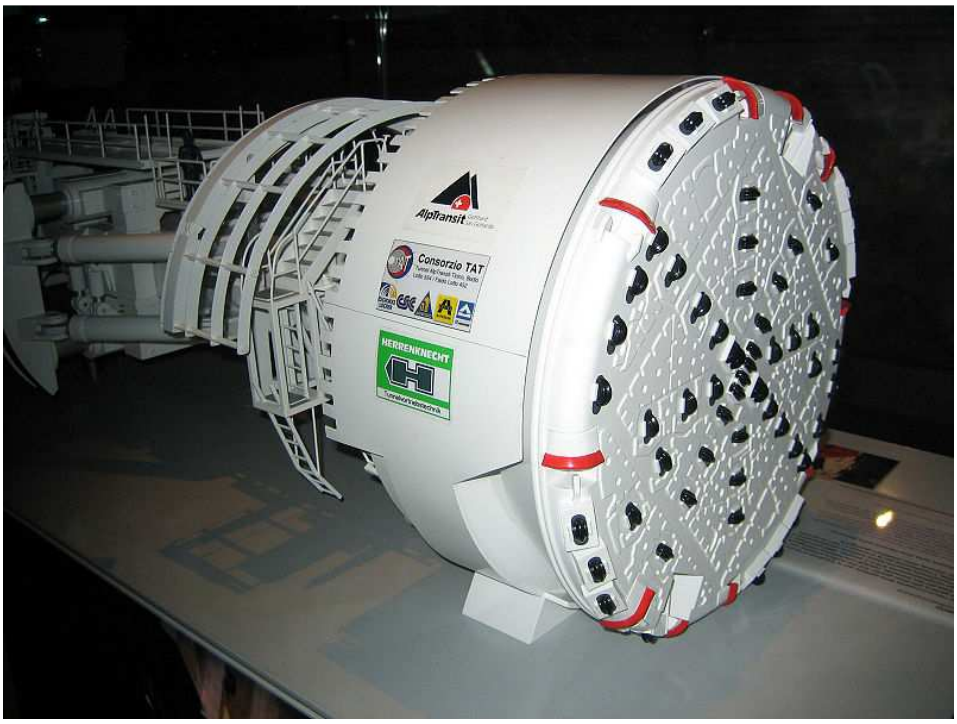

Figura 3.2. Topo de HERRENKNECHT de los Túneles de base del Gotardo. Fuente: [2]

Los cortadores son discos de metal duro que giran libremente sobre su eje y son de mayor diámetro cuanto mayor sea la dureza de la roca. En la figura 3.3 se puede apreciar en detalle la apariencia de este tipo de cortadores. Actualmente, los más utilizados son los de 432 mm de diámetro, existiendo algunas realizaciones con 533 mm para rocas muy duras. Normalmente, los cortadores se disponen en la cabeza de la máquina en forma de espiral, para que, al girar la misma, puedan describir círculos equidistantes, y únicamente hay una concentración de cortadores en el centro de la cabeza para forzar la rotura de la roca en esa zona a modo de cuele. El mecanismo de rotura de la roca, forzado en la zona central de la manera indicada, progresa en los círculos siguientes hacia el espacio ya excavado, y para facilitar este trabajo se dota a las cabezas de una pequeña conicidad.

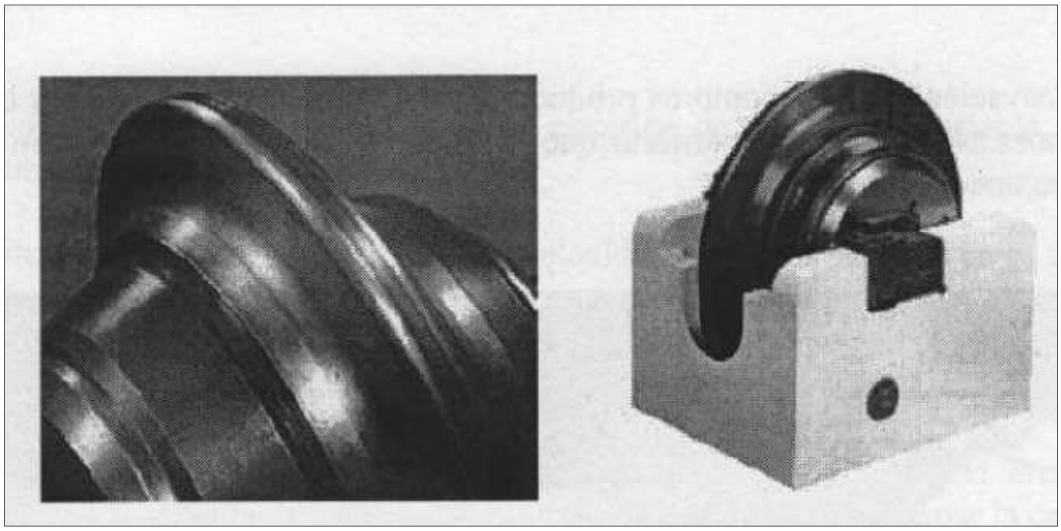

Figura 3.3. Vista de detalle y en perspectiva de un cortador (Robbins Company). Fuente: [17]

Para la excavación de los escombros producidos, la cabeza incorpora además una serie de cangilones situados en su periferia que recogen el escombro y lo elevan para su descarga en una cinta primaria.

El guiado de un topo se suele hacer materializando con rayo láser un eje paralelo al del túnel. En cualquier caso, es necesario cada vez que se adelante el láser y en las tangentes de entrada y salida a las curvas verificar el eje y la rasante con topografía convencional.

El back-up incorpora transformadores y carretes de mangueras eléctricas; captadores de polvo, casetes de ventilación; polipastos para manejo de vías y dovela de solera y un sistema de evacuación de escombros.

Para el sostenimiento en los casos de fracturación ligera o media del macizo, se utilizan bulones como primer tratamiento, incorporando a la maquina bulonadoras hidráulicas y colocadores de cerchas, con dispositivos que buscan la total mecanización del proceso. En los casos de fracturación notable o rocas meteorizables el sistema idóneo de sostenimiento es el hormigón proyectado o gunita.

3.2.1.2. Escudos

Los escudos se utilizan en su mayor parte en la excavación de rocas blandas y en suelos, frecuentemente inestables y en ocasiones por debajo del nivel freático, en terrenos saturados de agua que necesitan la colocación inmediata del revestimiento definitivo del túnel. Todos estos trabajos se realizan al amparo de una coraza que da el nombre a este tipo de máquinas.

Este tipo de tuneladoras también dispone de una cabeza giratoria, incluida en el primer cuerpo de la coraza e igualmente accionada por motores eléctricos, pero normalmente incorpora picas o rascadores, y avanza mediante el empuje de una serie de gatos perimetrales que se apoyan sobre el revestimiento definitivo de forma inmediata, éste se puede incorporar al retraerse los gatos después de cada avance. La cabeza giratoria está accionada por motores hidráulicos que permiten una variación constante de la velocidad de giro, entre 0 y 9-10 RPM y la reversibilidad de la misma. La cabeza normalmente monta picas o cinceles, y en ocasiones puede incluso incorporar discos. En terrenos muy variables se pueden colocar discos y picas a la vez. La cabeza también dispone de una serie de aberturas, frecuentemente regulables, por las que el escombro arrancado pasa a una cámara en la que una cinta primaria se ocupa de su evacuación.

En el segundo cuerpo de la coraza se encuentran los motores y los cuerpos de mando y control.

En el tercer cuerpo de la coraza o cola del escudo, se sitúan los cilindros de empuje y el erector de dovelas. Los cilindros de empuje están distribuidos en toda la periferia de la máquina, y están equipados con zapatas articuladas que permiten el apoyo uniforme sobre las dovelas del revestimiento. Su recorrido marca el ciclo del avance, estando normalmente comprendido entre 1,20 y 1,50 m. Cuando ha finalizado cada ciclo de excavación, se retraen estos cilindros y, al amparo del tramo de coraza que queda libre, se procede a colocar un nuevo anillo de revestimiento mediante el erector de dovelas

El back-up incorpora los transformadores, casetes de cable, casetes de ventilación, depósitos para el mortero de inyección, etc., y el sistema de evacuación de escombro normalmente está formado por una cinta puente que aloja en su interior el tren completo. Los sistemas de desescombro de los escudos suelen ser más sencillos que en el caso de los topos, debido a que en cada ciclo de avance se debe colocar un anillo de dovelas (20-35 min de duración), lo que permite el cambio de trenes sin interferencias con el avance.

Los rendimientos de este tipo de TBM suelen ser muy elevados, aunque por lo general menores a los de los topos, como se demuestra en la comparativa de la tabla 3.1. Esta diferencia de rendimientos radica en la necesidad de los escudos de esperar a la colocación de los anillos para poder avanzar en la excavación.

Operación	EPB - SLURRY Minutos	TBM ROCA Minutos
Excavación	25	20
Grippers cabeza, avance escudo	No	5
Colocación de anillo	22	Durante excavación
Ajuste de gatos	2	0
Ciclo total, minutos	49	25
Avances teóricos en 24 hrs	29	58
Longitud de dovela, m	1,5	1,5
Avance teórico en metros / mes (teórico máximo sin paradas, averías ni mantenimientos)	1.305	2.610
Avances reales máximos en 24 hrs	28 anillos	60 anillos

Tabla 3.1. Comparación de avances de escudo (EPB) y topo (TBM). Fuente: [21]

En función de la estabilidad del frente de trabajo podemos hablar de escudos abiertos para frentes estables y de escudos cerrados para aquellos frentes que puedan presentar señales de inestabilidad. En la tabla 3.2 se representa la tipología actual de estas máquinas.

TIPOLOGÍA DE LA CABEZA	MÉTODO DE EXCAVACIÓN	ESTABILIZACIÓN DEL FRENTE	SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE ESCOMBROS	TIPO POSIBLE DE REVESTIMIENTO (DOVELAS)	SECCIÓN TIPO A EXCAVAR
Abierta	Manual (martillo picador, etc.)	Únicamente de tipo "pasivo" (Máquina parada)	Cinta	• Expandidas • Ordinarias inyectadas o • Atornilladas inyectadas	Circular Posible herradura o rectangular
	Semimecanizado (cuchara, rozadora, martillo pesado, etc.)				
	Mecanizados (rueda)				
Cerrada	Mecanizados (rueda sin presión)	Cierre mecánico activo		• Atornilladas e inyectadas	Circular
	Presurizados de rueda	Aire comprimido	Tornillo sinfín		
		Presión equilibrada de tierras (E.P.B.)			
		Lodos bentoníticos (hidroescudos)	Transporte hidráulico por tubería		

Tabla 3.2. Tipología de escudos. Fuente [17]

3.2.1.2.1. Escudos abiertos

Se utiliza normalmente cuando el frente del túnel es estable y las afluencias de agua reducidas, bien por trabajarse por encima del nivel freático o bien por ser terrenos impermeables.

En este tipo de escudos, el elemento excavador puede ser manual o estar constituido por un brazo excavador o un brazo rozador.

Dentro de este grupo, se deben incluir también los escudos mecanizados con cabeza giratoria, dotada de picas, que en ocasiones pueden ser cortadores de discos, convirtiéndose la máquina en un auténtico topo escudado.

En cualquier caso, son máquinas relativamente sencillas, que se adaptan bien a condiciones variables de terreno, siempre que éstas no sean extremadamente difíciles.

Este tipo de máquinas no son muy utilizadas en los túneles de gran longitud debido al peligro que supone tener el frente abierto en condiciones de elevadas presiones, por lo que se suele recurrir a tipologías más complejas.

3.2.1.2.2. Escudos cerrados

Están diseñados para trabajar en terrenos difíciles, no cohesivos, con frecuencia bajo el nivel freático y saturados en agua, en frentes claramente inestables.

Se puede distinguir entre los siguientes conceptos o tipos de máquinas, que se describen a continuación.

- *Escudos mecanizados de rueda o con cierre mecánico*

En estas máquinas, se dispone de unas puertas de abertura controlada hidráulicamente, que en caso necesario se pueden cerrar totalmente, quedando el túnel sellado. Mediante la regulación de la apertura de estas puertas, se puede controlar la cantidad de material excavado y que penetra en la cámara. Este sistema permite, además, regular de un modo muy preciso el flujo de material procedente de la excavación, que se puede excavar mediante una cinta transportadora convencional.

En cualquier caso, la máquina trabajaría de forma parecida a un escudo de presión de tierras, aunque lógicamente con limitaciones, sobre todo en presencia de agua. Por este motivo está mucho más extendido el uso de la tipología EPB en la excavación de túneles de gran longitud.

- *Escudos presurizados con aire comprimido*

El aire comprimido se ha utilizado desde hace bastantes años para presurizar totalmente los túneles construidos bajo freáticos no muy importantes (0.1 o 0.2 Mpa), entre la exclusa inicial de entrada y el frente, en cifras ligeramente superiores a la carga agua + terreno. En la figura 3.4 se muestra la cabeza de un escudo presurizado con aire comprimido.

La única condición era disponer de un terreno con coeficiente de permeabilidad al aire bajo, constituido en su mayoría por arenas finas, arcillas y limos.

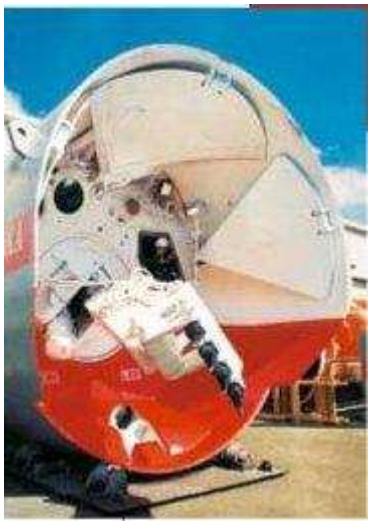

Figura 3.4. Cabeza de un escudo presurizado con aire comprimido. Fuente [20]

El sistema, teóricamente sencillo, hoy en día está prácticamente abandonado, ya que cualquier pérdida de aire, ya sea en el frente del túnel o a través del propio revestimiento, podría originar una catástrofe. Además, la descompresión exigida por las normativas actuales, para el personal que trabaja en estas circunstancias, encarecería notablemente el proceso.

En realidad, en la práctica, la presurización de la cámara frontal del escudo con aire comprimido ha quedado reducida a situaciones de emergencia en escudos de bentonita o EPB.

- *Hidroescudos o escudos de bentonita (Slurry Shield)*

Los hidroescudos utilizan la propiedad tixotrópica de los lodos bentoníticos para conseguir la estabilización del frente del túnel. En la figura 3.5 se ilustra el esquema funcional de un escudo de bentonita.

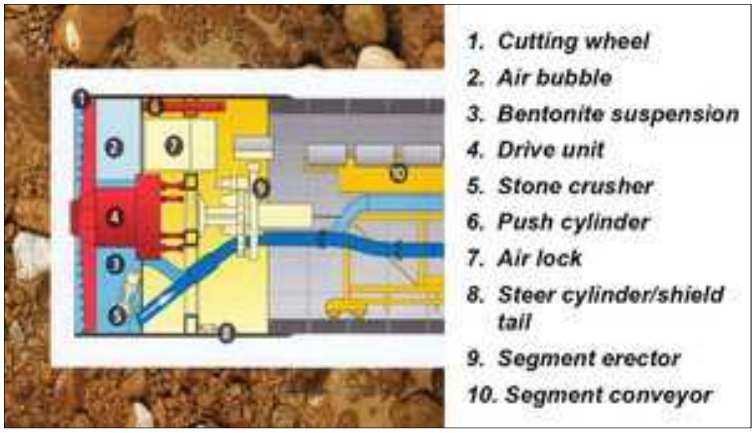

Figura 3.5. Esquema de un escudo de bentonita. Fuente [J]

Son máquinas adecuadas para trabajar en terrenos difíciles, constituidos principalmente por arenas y gravas u otros materiales blandos y fracturados bajo presión de agua, en los que la inyección de lodos, además de contribuir a la estabilidad del terreno, ayuda al transporte mediante bombeo de los productos de excavación.

La problemática de este método es que la separación de la bentonita, se encarece muchísimo cuando los materiales finos que pasan por el tamiz 200 superan cifras en el entorno del 20%. Además, si hay partes apreciables de limos o arcillas, la separación es técnicamente imposible. La gran variabilidad geológica que presentan los túneles de gran longitud desaconseja el empleo de este tipo de maquinaria.

- *Escudos de frente en presión de tierras (EPB)*

En este tipo de escudos, llamados E.P.B. ("Earth Pressure Balance") se abarcan prácticamente la totalidad de terrenos que pueden presentar inestabilidades.

La idea de estas máquinas, viene en parte de los hidroescudos y en parte de los escudos de rueda presurizados con aire comprimido. Del primero toma el principio del sostenimiento del frente mediante un equilibrio de la presión del terreno más el agua, con la presión que se mantiene en la cámara de la cabeza del escudo, y del segundo el principio de evacuar el escombro en un estado próximo al sólido mediante un tornillo sinfín en la fase de paso a la presión atmosférica y por medios convencionales en la fase final. En la figura 3.6 aparece una de las EPB utilizadas en la excavación del Eurotúnel.

Figura 3.6. EPB utilizada en la excavación del Túnel del Canal de la Mancha desde el lado francés. Fuente: [K]

En los terrenos arenosos o con gravas que presentan una plasticidad muy baja o nula, es necesario inyectar en la cabeza de la máquina una serie de productos que, en forma de polímeros o espumas, se mezclan con el terreno y el agua que contiene, mejorando la plasticidad y colaborando eficazmente en la estabilidad del frente.

Para controlar el sistema de equilibrio por presión de tierras es necesario el control del volumen de escombro desalojado, lo que se consigue controlando y manteniendo constante la velocidad del tornillo sinfín en relación con la presión de tierras dentro de la cámara. La máquina dispone de detectores de presión en cabeza, cámara y tornillo cuyas lecturas permiten el control de la estabilidad del frente.

Hoy en día, el sistema de presión balanceada de tierras se corresponde con la tecnología predominante en todo el mundo para la excavación de túneles en suelos bajo nivel freático.

3.2.1.3. Dobles escudos

Son máquinas concebidas basándose en un escudo telescópico articulado en dos piezas, que además de proporcionar un sostenimiento continuo del terreno durante el avance, de forma similar a como trabaja un escudo, permite en aquellos casos en que el terreno puede resistir la presión de unos grippers, simultanear las fases de excavación y sostenimiento, con lo que se pueden conseguir rendimientos muy elevados.

Normalmente presentan cabezas de corte mixtas que incorporan cortadores de disco y picas simultáneamente.

El escudo delantero, además de servir como estructura soporte de la cabeza de corte, contiene el rodamiento principal, la corona de accionamiento y los sellos interno y externo.

El escudo trasero, también llamado escudo de anclaje, es el que incorpora las zapatas de los grippers. Su extremo delantero se proyecta hacia delante dentro de una carcasa sujeta al escudo delantero, permitiendo una acción telescópica que proporciona un sostenimiento continuo al terreno. La parte posterior de este escudo incorpora en su interior al erector de dovelas y a los cilindros auxiliares de empuje, similares a los de un escudo normal.

En la figura 3.7 se puede apreciar la cabeza del doble escudo utilizado en la excavación de los túneles de Pajares.

Figura 3.7. Doble escudo de HERRENKNECHT utilizado en los Túneles de Pajares. Fuente: [18]

En terrenos que permiten a la máquina fijarse con la ayuda de los grippers, la máquina avanza mediante el empuje de los cilindros principales, que a su vez reaccionan sobre las zapatas de los grippers. En el caso de terrenos inconsistentes, incapaces de resistir la reacción al empuje con los grippers, el avance se realiza mediante el empuje de los cilindros auxiliares que reaccionan contra el obligado revestimiento prefabricado del túnel.

Estas máquinas son las más versátiles, ya que al presentan características conjuntas de los topos y de los escudos, pueden trabajar en terrenos de muy diferente naturaleza. Esta versatilidad es la que las ha convertido, a pesar de su elevado coste, en una de las soluciones más empleadas en los túneles de gran longitud más modernos.

3.2.1.4. Características de las tuneladoras empleadas en los túneles estudiados

En la tabla 3.3 se incluyen datos interesantes sobre las tuneladoras empleadas en los diferentes túneles analizados en el presente estudio. Cabe destacar que no se incluye el túnel de Seikan, debido a que no se emplearon este tipo de maquinas en su excavación, así como el túnel de base de la línea Lyon-Turín, ya que actualmente aún se están desarrollando las tareas de excavación del túnel de servicio. El túnel de base del Brenero si que finalizó recientemente la excavación de su túnel de servicio, por lo que se han presentado los datos referentes a esa excavación.

CARACTERÍSTICAS DE LAS TBM EMPLEADAS EN LOS TÚNELES ESTUDIADOS						
Túnel	Longitud (km)	Tipo terreno	Tipo TBM	Distancia excavada TBM (km)	% túnel principal TBM	Avances medios TBM (m/mes)
St. Gotthard	57.0	Gneiss y granito	Topo (HERRENKNECHT)	10.7	65	465
			Topo (HERRENKNECHT)	10.7		
			Topo (HERRENKNECHT)	11.1/13.4		
			Topo (HERRENKNECHT)	11.1/14.1		
Brennero	55.0	Granito y filita cuarzosa	Doble escudo (túnel de servicio)	10.4	70*	480
Eurotúnel	50.5	Arcilla dura, yeso azul y arena verde	Topo (tramo mar tren N. ingl.)	17.7	100	690
			Topo (tramo mar tren S. ingl.)	18.8		810
			Topo (tramo tierra tren N. ingl.)	7.9		600
			Topo (tramo tierra tren S. ingl.)	7.9		660
			Topo (tramo mar servicio ingl.)	21.8		650
			Topo (tramo tierra servicio ingl.)	7.9		600
			EPB (tramo mar tren N. francia)	20.0		680
			EPB (tramo mar tren S. francia)	18.9		700
			EPB (tramo tierra tren francia)	6.5		330
			EPB (tramo mar servicio francia)	15.6		280
			EPB (tramo tierra servicio francia)	3.2		320
Lötschberg	34.6	Granito competente, Gneiss y esquisto	Topo (HERRENKNECHT)	10.0	40	375
			Topo (HERRENKNECHT)	18.5		
Guadarrama	28.4	Gneiss y granito competente	Escudo doble (HERRENKNECHT)	14.2	100	435
			Escudo doble (WIRTH)	14.2		498
			Escudo doble (HERRENKNECHT)	14.1		546
			Escudo doble (WIRTH)	14.3		531
Pajares	24.9	Pizarras, areniscas y calizas	Escudo simple (HERRENKNECHT)	15.0	100	403
			Escudo simple (NFM-WIRTH)	9.9		469
			Escudo doble (HERRENKNECHT)	9.8		358
			Escudo simple (NFM-WIRTH)	10.3		344
			Escudo simple(MITSUBISHI-ROBBINS)	9.5		256

Tabla 3.3. Características de las TBM empleadas en los túneles analizados. Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Excavación mediante el Nuevo Método Austríaco (N.A.T.M.)

Bajo las siglas de N.A.T.M. ("New Austrian Tunnelling Method") se halla uno de los métodos de diseño y ejecución de túneles en roca más extendidos y de mayor éxito en todo el mundo dentro del ámbito de la ingeniería civil. [17]

Se debe puntualizar que no se trata de un "método", propiamente dicho, sino más bien de una "filosofía de actuación", llegando a decir Bieniawski en 1989 que "the word -method- in the english translation is unfortunate, as it has led to some misunderstanding".

Se basa en la integración del terreno que rodea a la excavación en el anillo estructural autoportante formado entorno a la cavidad. Dicho método pretende relajar el estado tensional del macizo rocoso entorno al túnel, permitiendo su deformación hasta un punto de equilibrio en que el sostenimiento controla dicha deformación. Esto se consigue mediante técnicas de auscultación y medida de convergencias, para controlar las deformaciones en todo momento y evitar que estas sean excesivas, por lo que se puede realizar el túnel con un costo mínimo y una máxima seguridad.

La gran baza del método es su adaptabilidad a diferentes secciones, así como a condiciones geomecánicas variables, gracias al abanico de posibilidades que da el poder aplicar diferentes tipos de sostenimientos en función de las medidas de convergencia. Estas ventajas lo han llevado a ser el principal método de excavación de las galerías transversales de los túneles de gran longitud modernos, así como de sus galerías de acceso.

El método se basa en veinte principios fundamentales, siendo cinco los más importantes:

- Utilizar la propia roca como elemento resistente frente a los incrementos locales de tensión que se producen durante la excavación.
- Utilizar métodos de excavación que minimicen el daño producido al macizo, con gunitados de protección nada más excavar.
- Instrumentar las deformaciones en función del tiempo, con ayuda de clasificaciones geomecánicas y ensayos de laboratorio.
- Colocar sostenimientos iniciales flexibles, protegiendo el macizo de meteorizaciones, descompresiones, etc, con la velocidad adecuada, para evitar el comienzo de daños.
- Colocar el revestimiento definitivo, si es necesario, también flexible, minimizando así los momentos flectores, añadiendo resistencia adicional con cerchas o bulones, pero no con secciones rígidas.

En la ejecución de un túnel por el Nuevo Método Austríaco, se comienza por la excavación de la bóveda, avanzando entre 1 y 3 metros de longitud. A continuación se coloca un sostenimiento provisional, habitualmente cerchas de acero unidas por tresillones metálicos, que en ocasiones se sella mediante una capa de hormigón proyectado. Detrás, con un desfase de unos 18 m, se hormigona la bóveda con el revestimiento definitivo. Posteriormente, se excava la destroza en forma de caja central, dejando algo más de un metro de terreno próximo a los hastiales, para que sirva de apoyo a la bóveda y los empujes que ésta transmite no originen roturas. A continuación se excavan los hastiales por bataches al tresbolillo, y se hormigonan en una longitud similar a la de un anillo (aproximadamente 2.5 m); y por último, se excava y hormigona la solera o contrabóveda. En la figura 3.7 se muestran de forma esquemática las tareas de colocación de los distintos sostenimientos empleados por el NATM.

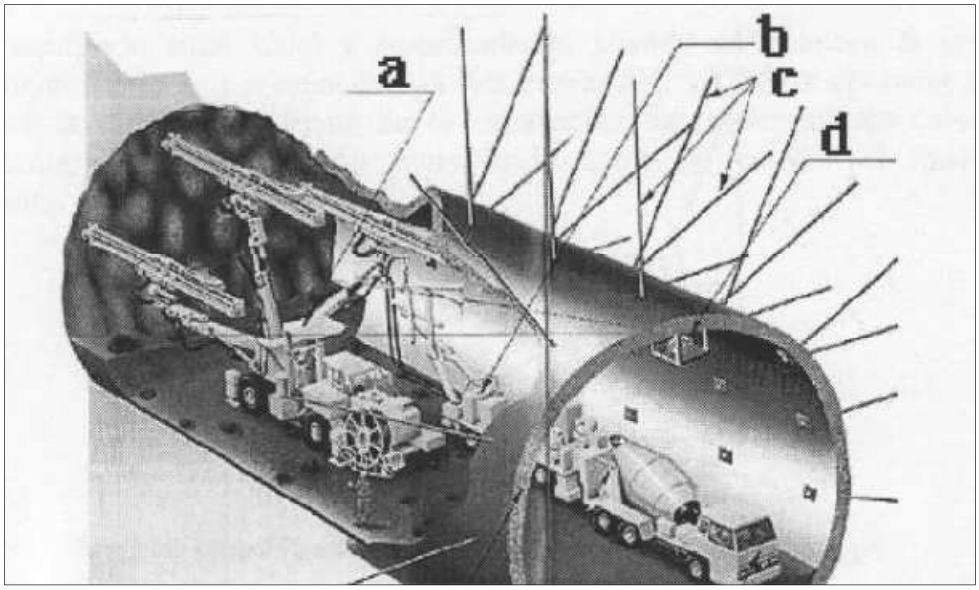

Figura 3.7. Esquema tridimensional que representa las tareas de colocación de los distintos sostenimientos en la excavación de un túnel por el NATM. Fuente: [17]

Los revestimientos definitivos más empleados por el NATM son los siguientes:

- Bulones: Los bulones son barras de acero (o fibra si el uso es en el frente) que se anclan en el terreno a través de la bóveda, mediante resinas o lechadas de hormigón, y que pueden tener longitudes variables (3-12 m normalmente) y diámetros entre los 16 y los 25,4 mm. Son piezas sometidas a tracción y pueden ser activos o pasivos (entran en carga cuando se deforma la roca). A mayores densidades y mayor longitud y sección, más resistente será la corona de sujeción que forma el conjunto de bulones con la roca. Los bulones tienden a ser uno o dos órdenes de magnitud más flexibles que los revestimientos continuos.
- Cerchas metálicas: Son arcos de acero colocados por piezas que van unidas, o bien con bridas atornilladas (tipo TH) o bien soldadas (tipo HEB). En la figura 3.8 se ilustran tareas de instalación de este tipo de sostenimiento. Este tipo de sostenimiento se utiliza en zonas con terrenos que presentan una resistencia baja,

tales como fallas o zonas plastificadas. A mayor densidad de cerchas por tramo, la resistencia estructural obtenida será mayor. Es importante conocer la carga máxima que pueden resistir antes de romper.

Figura 3.8. Instalando cerchas metálicas en el túnel de acceso de Faido (San Gotardo). Fuente: [2]

- Hormigón proyectado/gunita: Es el sostenimiento más empleado en la excavación de túneles por el NATM. Se aplica al menos una capa de hormigón después de cada avance en la práctica totalidad de terrenos. La densidad del hormigón es un parámetro clave, ya que si el hormigón es muy poco denso, no tendrá la adherencia necesaria, y si es muy espeso no se podrá proyectar con facilidad. La rigidez de la capa de hormigón depende directamente de su espesor, no tanto del mallazo, cuyo papel es asegurar la continuidad de la protección y evitar fisuraciones locales.
  La gunita, es un tipo de hormigón proyectado al que se le ha añadido un armado en forma de fibras. Se suele utilizar para estabilizar el frente antes de colocar el sostenimiento.

Los métodos de excavación empleados bajo la filosofía del NATM son básicamente dos: excavación con explosivos y excavación mecánica mediante máquinas rozadoras.

3.2.2.1. Excavación con explosivos

El método de perforación y voladura es uno de los más utilizados en túneles de roca, sobre todo cuando ésta es muy resistente y/o abrasiva. Consiste básicamente en realizar unos taladros llamados barrenos, cargarlos de explosivos y detonarlos. La detonación produce una onda expansiva que fractura la roca. Por estas fracturas penetran los gases producidos en la explosión y estos terminan empujando y desmenuzando la roca, obteniendo la granulometría prevista en el diseño de la carga.

El ciclo básico de excavación consta de las siguientes operaciones (esquematizadas en la figura 3.9):

1. Replanteo topográfico en el frente del esquema de tiro.
2. Perforación de los barrenos mediante jumbos o martillos perforadores manuales.
3. Carga de los barrenos con explosivos.
4. Voladura y extracción de los gases tóxicos.
5. Retirada del escombro y saneo del frente, bóveda y hastiales.
6. Sostenimiento (bulonado y gunitado).

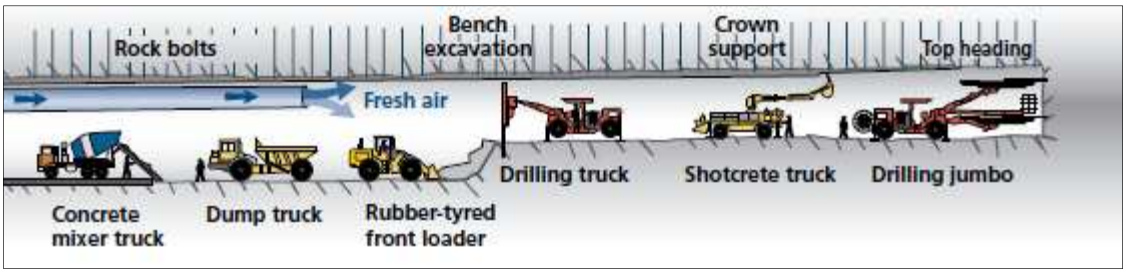

Figura 3.9. Diferentes tareas realizadas durante la excavación mediante perforación y voladura en el túnel de base del Gotardo. Fuente: [2]

El esquema típico de voladura consta de las siguientes zonas:

- Cuele: Por cuele entendemos una parte de barrenos, cargados o no, cuya misión será la de crear un hueco inicial en la galería, de forma que los barrenos posteriores, encuentren ya en su disparo una cara libre inicial creada. Generalmente se suele situar en el centro aproximado de la galería. Las características básicas del cuele son una elevada penetración específica y un consumo específico de explosivo muy elevado.
- Contracuele: Por contracuele entendemos la corona de barrenos que circunvala a los del cuele. Mientras el cuele crea un primer hueco, el contracuele lo ensancha para preparar la cara libre a la destroza o voladura principal, con un mayor hueco que permita la evacuación del escombro de la misma. En consecuencia, en el contracuele hay menos perforación específica, todos los barrenos están cargados, pero con un menor consumo específico que el cuele, aunque continúan siendo tiros claramente sobrecargados.
- Destroza: Comprende el área de barrenos entre el contracuele y el límite del recorte. Esta es la voladura principal, en cuanto a volumen de arranque en la galería. El esquema utilizado en una destroza, es función del tipo de roca, diaclasado, diámetro de perforación, profundidad de avance, tipo de explosivo, secuencia de encendido, granulometría deseada y geometría de la excavación. El esquema suele ser más abierto, con consumos específicos de explosivo menores que en los casos anteriores.

- Recorte: Por recorte entendemos la fila o corona de barrenos que marca la sección del túnel por el techo y los hastiales. Estos barrenos, siempre un poco angulados, aparte de arrancar su piedra, deben marcar el perfil final del túnel. Por tal motivo, su número, espaciamiento y carga, son determinantes de la calidad de la terminación del perfil final.
- Zapateras: Por estos barrenos entendemos los de piso de túnel. Estos barrenos, últimos en dispararse generalmente, son tiros pinchados y sobrecargados pues precisan una energía adicional para conseguir el "levante" de la piedra que los afecta, en contra de la gravedad. [20]

En la figura 3.10 aparece una sección de túnel en la que se pueden apreciar las zonas de voladura típicas.

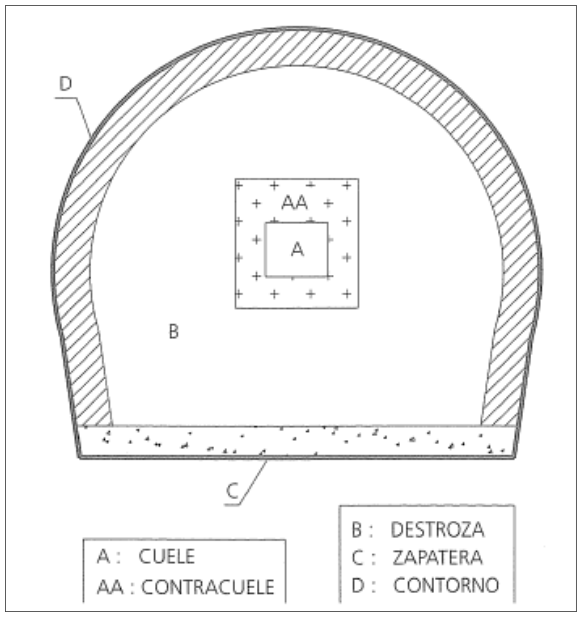

Figura 3.10. Zonas de voladura en el esquema clásico. Fuente: [20]

3.2.2.2. Excavación con máquinas rozadoras

Las rozadoras son máquinas excavadoras que tienen un diseño modular, como consecuencia de que en muchos casos es preciso su montaje o reparación en espacios cerrados de dimensiones reducidas.

Básicamente, realizan su trabajo mediante una cabeza giratoria, provista de herramientas de corte que inciden sobre la roca, y que va montada sobre un brazo monobloque o articulado, como ilustra la figura 3.11. Además consta con un sistema de recogida y transporte de material que lo evacua desde el frente de arranque hacia la parte trasera de la máquina. Todo el chasis va montado sobre un chasis móvil de orugas.

Figura 3.11. Rozadora Alpine de 100 T y con cabeza transversal. Fuente: [L]

Hoy en día la excavación de túneles con rozadoras o minadores se realiza generalmente en terrenos de resistencia media-blanda y obras de longitudes pequeñas, inferiores a los dos kilómetros, donde no son rentables los sistemas de sección completa, y en zonas de rocas medias-duras, en competencia con la perforación y voladura, cuando existen restricciones ambientales que impiden la aplicación de ese método. En ocasiones, constituye un complemento adecuado a las máquinas TBM, para conseguir secciones finales de determinadas obras, por ejemplo una caverna, imposibles de conseguir a sección completa por razones de coste.

Las velocidades de traslación de este tipo de máquinas no suelen ser superiores a los 5 m/min, pero para poder remolcarlas de forma rápida se desacoplan las ruedas de transmisión de cada una de las cadenas.

El movimiento horizontal del brazo se efectúa generalmente por dos cilindros hidráulicos de movimientos opuestos, y el movimiento vertical por dos cilindros hidráulicos que actúan sobre el soporte del brazo rozador.

En las rozadoras se distinguen dos sistemas de trabajo, según la configuración geométrica del movimiento de la cabeza de corte:

- Cabeza de eje longitudinal o axial (milling). En este diseño el eje de giro es perpendicular al frente de excavación, estando las picas montadas sobre una hélice dispuesta en forma similar a la de un sacacorchos, como puede apreciarse en la figura 3.12. La fuerza de corte se aplica lateralmente, por lo que no se aprovecha todo el peso del equipo como fuerza de reacción.

- Cabeza de eje transversal (ripping). Las cabezas giran alrededor de un eje paralelo al frente, tal y como muestra la figura 3.12. Intervienen tres fuerzas en el arranque por parte de las picas. La fuerza horizontal se ejerce con el giro del brazo y la fuerza vertical con el peso de la rozadora. El par de corte y la fuerza vertical aplicados en las picas realizan los surcos en la roca, mientras que la fuerza horizontal provoca la rotura de la misma entre ellos.

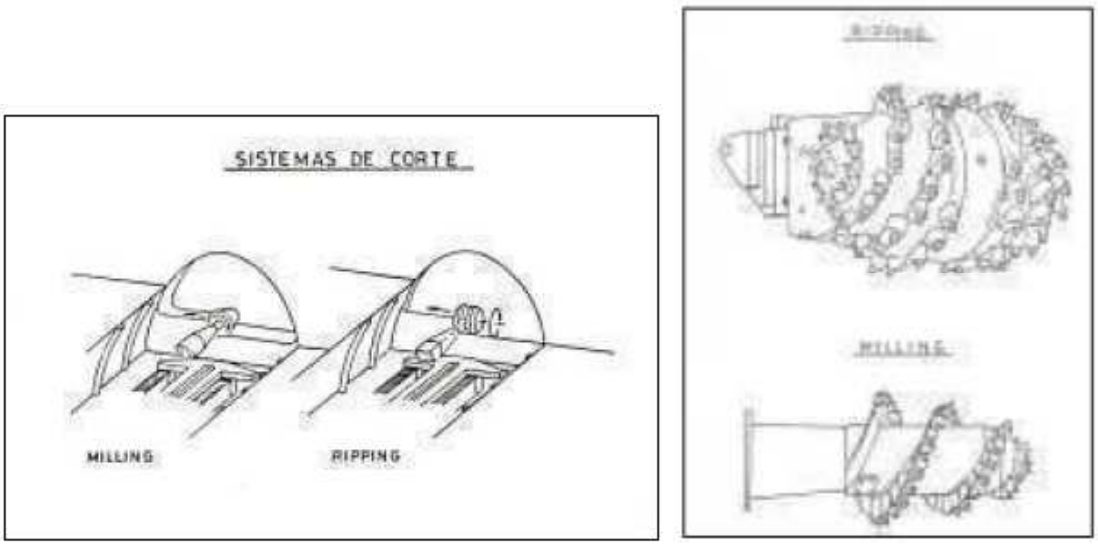

Figura 3.12. Periles de excavación y detalle de cada tipo de cabeza. Fuente: [17]

Debido a la forma diferente de corte, cada tipo de cabeza presenta una serie de ventajas e inconvenientes. Desde el punto de vista de la estabilidad, en las cabezas transversales no existe casi empuje lateral, por lo que los equipos de cabeza axial requieren un 20% más de peso que los de cabeza transversal.

El perfilado de las excavaciones, en cambio, es mucho más perfecto con las cabezas axiales que con las transversales, debido a la geometría de las cabezas.

En cuanto al rendimiento, si el equipo de cabeza axial se tiene que anclar a los hastiales el rendimiento es del orden del 25% inferior que con un minador de cabeza transversal. En caso contrario, las cabezas axiales avanzan mejor que las transversales, ya que al ser más estrechas penetran muy bien en el frente y, una vez dentro de la roca, al poder cortar en cualquier dirección se aprovechan mejor las partes débiles del macizo rocoso para efectuar el arranque.

El empleo de rozadoras frente a las TBM presenta las siguientes ventajas:

- Flexibilidad y maniobrabilidad.
- No se precisan grandes espacios para el montaje y desmontaje.
- Son más accesibles para el mantenimiento en el frente.
- Menor coste.
- Menor porcentaje de mano de obra especializado.

- Permite efectuar la excavación en fases, lo que resulta decisivo en terrenos de mala calidad.

Si se comparan las excavaciones con rozadoras con el sistema clásico de perforación y voladura, las ventajas más notables son:

- Admite una mayor mecanización.
- Perfilado exacto de la sección de excavación y reducción de sobreexcavaciones.
- Menor afección a la roca remanente.
- Ausencia de vibraciones generadas por la detonación de explosivos.
- Mejor adaptación a la construcción por fases.

3.2.3. Comparativa entre la excavación mediante TBM y mediante métodos de frente abierto (NATM) en los grandes túneles ferroviarios

3.2.3.1. En cuanto a seguridad

"Los túneles de frente abierto y gran sección (30 m^2 o mayores) son, desgraciadamente, una fuente constante de hundimientos y colapsos de frente y contorno, tanto en suelos como en roca. El informe de la HSE (Health & Safety Executive) inglesa, a raíz del hundimiento de los túneles NATM de Londres, incluye más de 39 catástrofes y colapsos, además de otros 71 que no detalla. Uno de los autores de ese informe, Mr. John Anderson, ha comunicado al autor que en estos momentos se estudian más de 157 colapsos debidos al trabajo con frente abierto en túneles, tan sólo en rocas blandas. De hecho, en España, importantes compañías aseguradoras se han negado ya, el 4 de Agosto de este año 2000, a asegurar varios túneles proyectados con el NATM por el gran número de hundimientos, colapsos y accidentes que acarrean los métodos de frente abierto" [21].

"La geotecnia no tiene hoy ninguna solución para garantizar la estabilidad del frente en un túnel abierto. En suelos y rocas blandas seguimos con el modelo de Broms y Bennermark de 1967 y sus derivados, que-el autor puede decirlo por haber pasado muchos días y noches en sus túneles intentando obtener algo útil del modelo Broms- no tienen ninguna utilidad práctica" [21].

Esta última afirmación es especialmente válida en los túneles de base a grandes profundidades, ya que el modelo de Broms y Bennermark está pensado para túneles someros:

"El número de estabilidad N aportado por Broms y Bennermark (1967) ha demostrado ser una herramienta útil para interpretar los resultados obtenidos, sin embargo los resultados que se muestran aquí indican que los valores críticos de N muestran una marcada variación con la profundidad, es decir, con la relación C/D del túnel. […] Los autores indican que los resultados presentados pueden usarse con garantías para el cálculo de estabilidad de túneles someros en condiciones no drenadas cuando la relación C/D < 3" [17].

Los proyectos de túneles en roca siguen incluyendo índices de calidad tales como el RMR y el Q del Norwegian Geotechnical Institute. Pero la experiencia ha demostrado que ninguno de ellos es adecuado para la estimación de la verdadera resistencia de un macizo rocoso. Los propios Prof. Hoek y Brown han revisado varias veces su criterio de resistencia, han analizado sus limitaciones y han dado guías para su adecuado uso [22]. El Prof. Brady indica textualmente que ninguno de estos criterios refleja adecuadamente la resistencia de un macizo rocoso [23]. El problema es que los índices de calidad parten del conocimiento del esquema completo de diaclasas, de las características del material de relleno, de la apertura de juntas y de la rugosidad de las paredes. Pero para obtener toda esta información en cada avance, serían necesarios varios sondeos cada 5 o menos metros de túnel, lo que resulta imposible tanto por coste como por plazo.

"Si no hay solución técnica para la estabilidad del frente en los suelos o rocas blandas, la única forma segura de construir un túnel es adosar al frente de éste una sólida pared de acero. Este es el concepto de las tuneladoras de frente cerrado. ¿Hay algún motivo para utilizar métodos menos seguros para la gente o para el túnel?" [21].

La falta de medidas de seguridad en los túneles de fines del siglo XIX y principio del siglo XX, excavados con frente abierto, llevaron a tener que lamentar numerosos accidentes laborales mortales. En el túnel de Mont Cenis murieron 28 hombres, en el S. Gotardo 1 la cifra de muertos oscila según las fuentes entre 177 y 310, con 877 inválidos o heridos graves. En el Simplon 1 ya comenzaron las medidas de seguridad e higiene, aunque murieron 39 hombres. En el Loetschberg murieron 37 hombres, en el Gran Apenino 97 hombres y en el San Gotardo carretero, 19 hombres. A pesar de que los túneles actuales son mucho más seguros, incluso trabajando con frente abierto, sigue habiendo muertos en los túneles de frente abierto, mientras que los accidentes mortales en los túneles con tuneladora son casi inexistentes.

3.2.3.2. En cuanto a costes (comparación de avances medios)

El tiempo de fabricación y el coste son dos de los motivos más esgrimidos en contra de la utilización de las tuneladoras.

Aunque una tuneladora tarda unos 10 o 12 meses en fabricarse, ya que se fabrican bajo pedido, el aumento de la velocidad de construcción que aporta (como veremos a continuación) compensa sobradamente la demora provocada por su largo tiempo de fabricación en túneles de longitudes considerables. En especial, para los túneles de gran longitud, el tiempo de fabricación es mínimo en comparación con los largos plazos de construcción.

Tanto la inversión inicial como el coste de mantenimiento de una tuneladora es elevado, consecuentemente, estos costes se deben compensar con el incremento de los avances medios que permite el empleo de este tipo de máquinas. Para que la tuneladora salga rentable el proyecto debe de tener una envergadura mínima, que se traduce en una longitud mínima de 2-4 km. El problema es que tradicionalmente los proyectos de líneas férreas han intentado evitar, en la medida de lo posible, la construcción de túneles

largos. Para ello se subían rasantes buscando construir túneles de la menor longitud posible, por lo que es común encontrar proyectos con multitud de túneles con longitudes menores de 1 km. Actualmente, en cambio, los grandes avances tecnológicos en el campo de las TBM permiten perforar túneles a una velocidad y con una seguridad insospechada poco tiempo atrás. En consecuencia, parece justificado bajar rasantes en los trazados ferroviarios para obtener un menor número de túneles con longitudes mayores en los que sea económicamente viable el empleo de TBM. Evitando así los altísimos viaductos entre túneles y reduciendo el número de emboquilles y arranques, que resultan la parte más cara, peligrosa y lenta de los túneles.

Para justificar las afirmaciones previas en cuanto a aumento del avance medio de las TBM respecto a los métodos de frente abierto, se presentan una serie de tablas comparativas de velocidad de construcción de túneles en diferentes tipos de terreno. Finalmente se mostrará una tabla comparando las velocidades de avance en los túneles de gran longitud estudiados:

- *Velocidad de construcción de túneles en roca:*

En la tabla 3.4 se comparan los avances medios de una serie de túneles famosos construidos con TBM y con otros construidos mediante frente abierto (NATM básicamente). A pesar de que el presente estudio no se centra en los túneles carreteros, se ha creído conveniente incluirlos en la comparativa de rendimientos, debido a que los métodos de excavación son muy similares.

La falta de medidas de seguridad en los túneles de fines del siglo XIX y principios del XX hace que sus velocidades de avance no puedan ser consideradas hoy como representativas, ya que la seguridad actual hace naturalmente ir a métodos más cuidadosos y lentos. El túnel de mejor construcción con frente abierto es el túnel de Mont Blanc, que tuvo un rendimiento total medio de 300 metros/mes. Este rendimiento no ha vuelto a obtenerse en ningún túnel manual. En la tabla 3.4 puede observarse como tan sólo los túneles de Arlberg y Simplón 1 se le acercan con 244 y 262 metros al mes. En España el túnel construido con NATM con un mejor rendimiento ha sido el túnel del Cadí con 161 m/mes, mientras que la media de los túneles españoles se encuentra en torno a los 50 m/mes. Actualmente las velocidades de avance de estos túneles de frente abierto son muy bajas, ya que raramente superan los 100 metros/mes.

Mientras que los rendimientos de los túneles de frente abierto tienden a bajar por el aumento de las medidas de seguridad, los rendimientos de los túneles construidos mediante TBM adecuadas tienden a incrementarse debido a las mejoras tecnológicas. En el recientemente terminado túnel de Tahwil (Suiza), por ejemplo, se ha obtenido un rendimiento medio de 428 metros al mes con tuneladoras adecuadas. Cabe destacar que en la tabla 3.4 tan solo aparecen los túneles finalizados antes del año 2000, los avances obtenidos por los túneles más modernos de mayor longitud son superiores y se analizarán posteriormente.

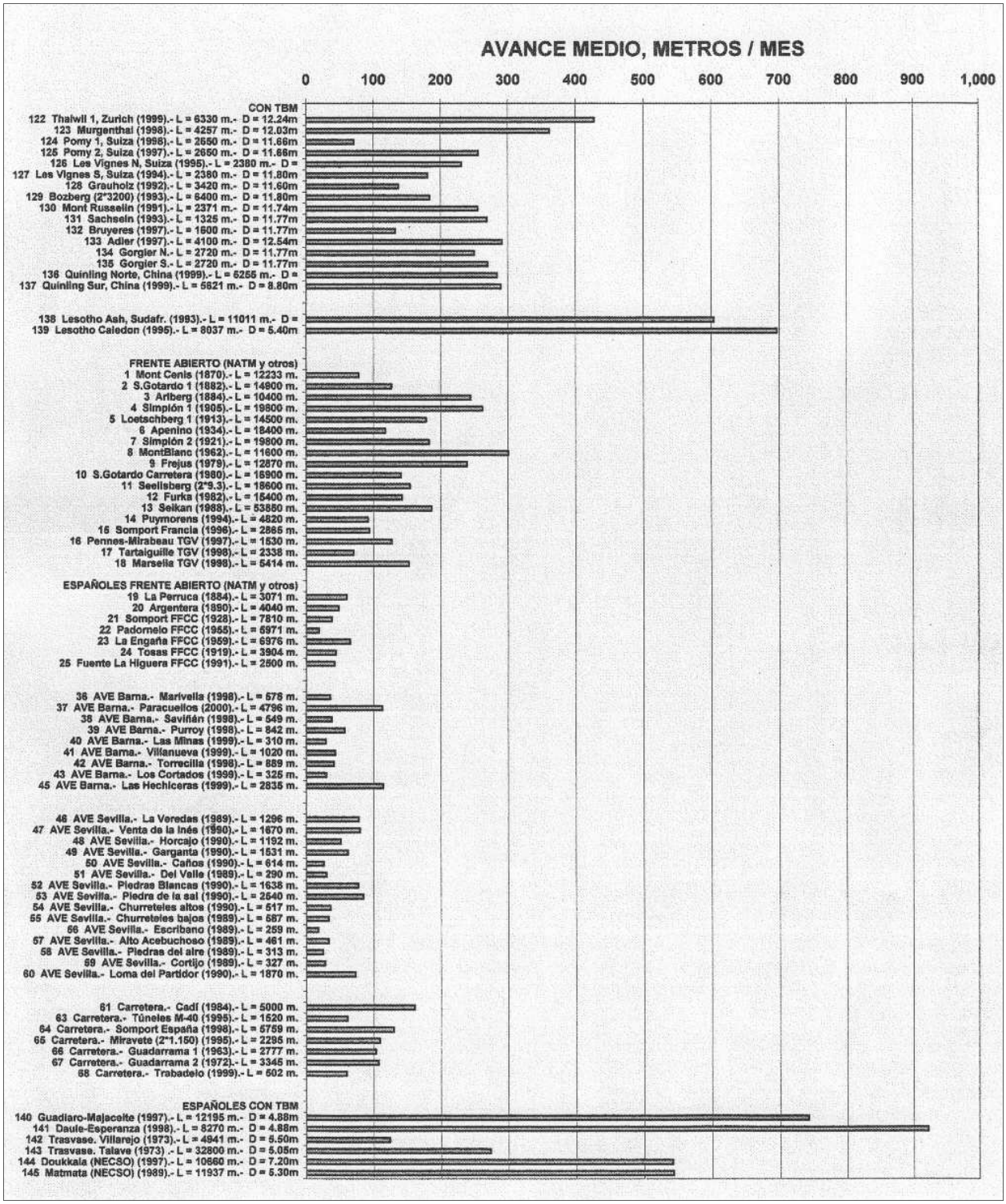

Tabla 3.4. Velocidad de construcción de túneles en roca. Desde el primer avance al fin del revestimiento. Fuente: [21]

- *Velocidad de construcción de túneles en rocas blandas y suelos:*

En la tabla 3.5 se puede observar como los túneles de más de 3 km construidos mediante tuneladoras tipo EPB suelen superar avances medios de 200 m/mes. Además, en el túnel del Canal de la Mancha y en los túneles del metro de Madrid las EPB superaron con facilidad los 300 metros al mes. Los topos ingleses del Canal superaron estos rendimientos, obteniendo una media de unos 670 metros al mes, pero arriesgándose a sufrir graves problemas de inundación de las máquinas.

Storebaelt, túnel de unión del continente con Copenhage, es un ejemplo de un proyecto realizado con EPB pero cuya gestión fue mala, tanto en la selección y especificaciones de las 4 tuneladoras como en la ejecución de la obra. Durante la construcción del túnel hubo roturas de las máquinas, inundaciones, islas artificiales, congelación del terreno y hasta incendios en las EPB. Consecuentemente se obtuvieron rendimientos inaceptablemente bajos, parecidos a los de los túneles sin mecanizar construidos por el NATM.

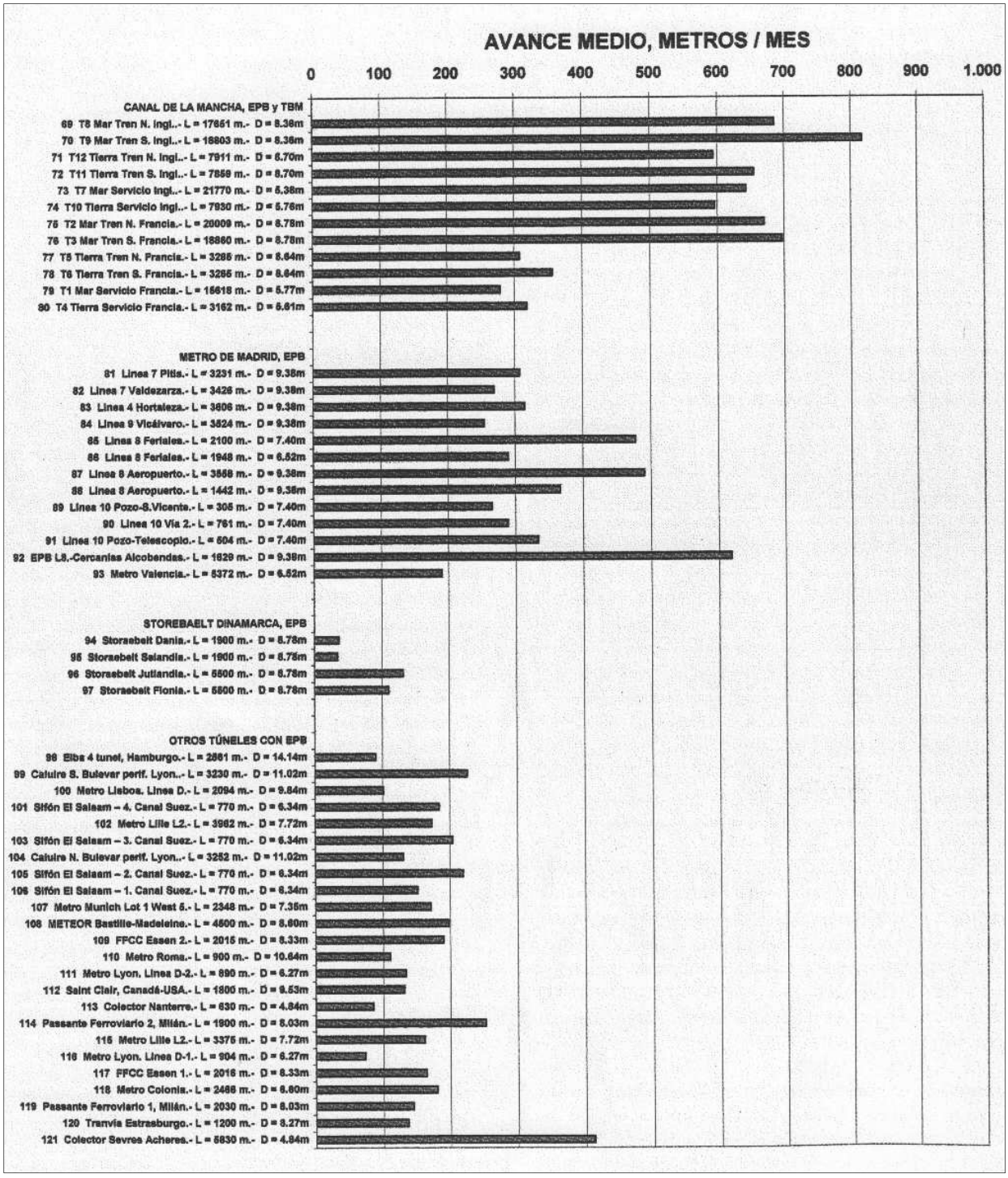

Tabla 3.5. Velocidad de construcción de túneles en suelos y rocas blandas. Desde el primer avance hasta el fin del revestimiento. Fuente: [21]

- *Comparativa de avances medios entre los túneles de gran longitud estudiados:*

Desde la terminación del enorme túnel de Seikan en Japón, probablemente debido a los graves problemas que se encontraron en su construcción con la perforación y voladura, ha tenido lugar un cambio en la forma de concebir la construcción de los grandes túneles. Los túneles de gran longitud construidos a finales del siglo XX y principios del XXI se han proyectan en base a la utilización de las tuneladoras.

Es en este tipo de túneles dónde las TBM alcanzan sus mejores rendimientos, como podemos observar en la tabla 3.6, debido a que las longitudes de estos túneles permiten mantener el pico de producción durante meses.

COMPARATIVA AVANCES MEDIOS EN LOS TÚNELES ESTUDIADOS							
Túnel	Longitud (km)	Tipo terreno	Nº TBM	% túnel principal TBM	Avances medios TBM (m/mes)	Avances medios NATM (m/mes)	Problemas
St. Gotthard	57.0	Gneiss y granito	4 topos	65	465	40	Altas presiones Altas temperaturas Zonas muy fracturadas
Brennero	55.0	Granito y filita cuarzosa	1 doble escudo	70*	480	-	Fallas Squeezing
Seikan	53.9	Roca volcánica, piroclástica y sedimentaria	0	0	-	187	Grandes filtraciones Terreno muy inestable
Eurotúnel	50.5	Arcilla dura, yeso azul y arena verde	6 topos 5 EPB	100	668 462	-	Fallas/grandes filtraciones Altas temperaturas
Lötschberg	34.6	Granito competente, Gneiss y esquisto	2 topos	40	375	180	Altas presiones Altas temperaturas Rock-bursting
Guadarrama	28.4	Gneiss y granito competente	4 escudos dobles	100	502	-	Altas temperaturas Zonas de falla
Pajares	24.9	Pizarras, areniscas y calizas	4 escudos simples 1 escudo doble	100	368 358	-	Plastificación pizarras Presencia de agua Zonas de falla Presencia gas metano

Tabla 3.6. Comparativa avances medios de las TBM y NATM en los túneles de gran longitud estudiados. Fuente: Elaboración propia

Analizando la tabla 3.6 se puede afirmar que el menor rendimiento medio obtenido por las TBM en estos túneles, los 358 m/mes del doble escudo de los túneles de Pajares, supera al avance máximo histórico de los métodos de frente abierto (los 300 m/mes del túnel de Mont Blanc) y casi duplica el avance medio por NATM del túnel de Seikan (máximo avance medio en método de frente abierto de entre los túneles estudiados). Cabe destacar que el avance medio entre los topos del Canal de la Mancha alcanza los 670 metros al mes, más del doble que el avance del túnel de Mont Blanc y que el avance medio entre todas las TBM de los túneles estudiados alcanza el notable valor de 460 metros al mes.

En la figura 3.7 se muestra la influencia de las TBM en la reducción del plazo de ejecución de los túneles de gran longitud estudiados. Para ello se comparan los meses de plazo de cada túnel, normalizados con relación a la longitud, con el tanto por ciento de la longitud de cada túnel excavada mediante tuneladoras. Se puede observar una clara tendencia a reducir los plazos a medida que aumenta el papel de las TBM en la excavación del túnel.

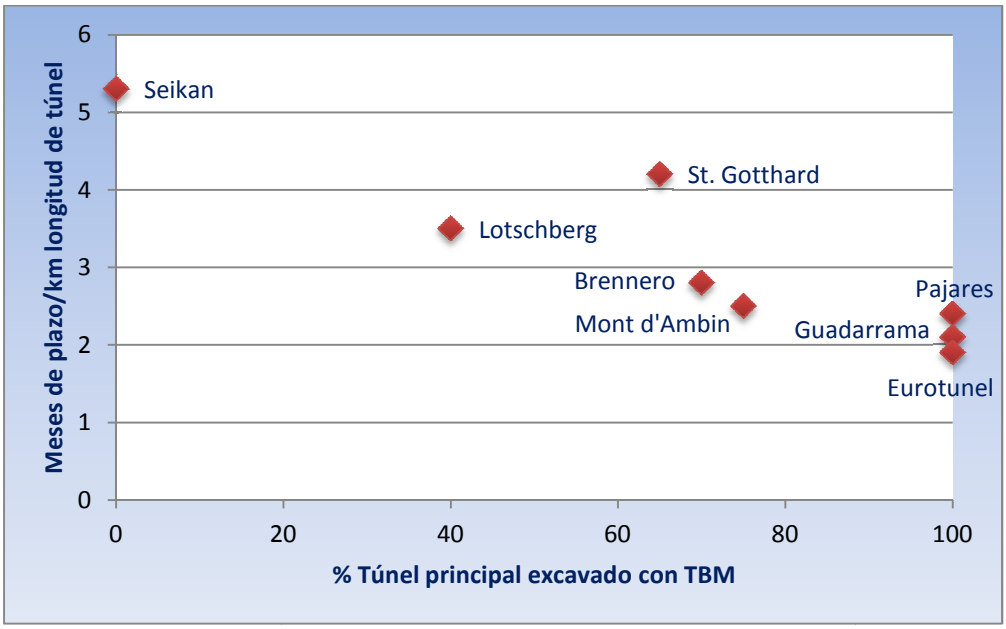

Figura 3.7. Influencia de las TBM en la reducción del plazo de los túneles estudiados.
Fuente: Elaboración propia.

4. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES EN CUANTO A CRITERIOS DE SEGURIDAD

4.1. INTRODUCCIÓN

Los túneles han sido, tradicionalmente, obras cilíndricas, cuyo acceso se restringía exclusivamente a las bocas. Esta configuración conlleva unos problemas de seguridad intrínsecos, que se incrementan notablemente con el aumento de la longitud del túnel. A mayor longitud, mayor distancia al exterior y por tanto, mayor riesgo.

Los túneles modernos de líneas de alta velocidad están batiendo constantemente los récords de longitud (llegando a superar los 50 km). Consecuentemente, en estos túneles de gran longitud la seguridad se ha convertido en uno de los principales condicionantes en el diseño, incrementando los costes de construcción notablemente. En este tipo de túneles ha cambiado el concepto tradicional de obra cilíndrica lineal uniendo las dos bocas, pasando a ser verdaderos complejos subterráneos dotados de la última tecnología en materia de seguridad.

4.2. CONFIGURACIÓN GENERAL DE LOS GRANDES TÚNELES

La configuración de los túneles de gran longitud viene determinada por múltiples aspectos, tales como la capacidad de transporte a través de la infraestructura, la planificación constructiva para la puesta en servicio y, fundamentalmente, los criterios de seguridad en la fase de explotación del túnel.

Los terribles accidentes sufridos en los túneles carreteros de tubo único de Mont Blanc (1999) y San Gotardo (2001), donde los incendios generados por los accidentes causaron la muerte de 41 y 11 personas respectivamente, sellaron definitivamente la necesidad de disponer de doble tubo y galerías transversales de conexión en los túneles largos ferroviarios. La configuración mínima para la explotación operativa de los grandes túneles, por tanto, es la de doble tubo con galerías de conexión establecidas a una distancia suficiente para garantizar la evacuación del túnel accidentado en tiempos mínimos. A partir de esta configuración elemental mínima, se pueden ir añadiendo distintas alternativas:

- Galería de seguridad y servicios de emergencia, paralela a los dos tubos gemelos de la infraestructura de transporte. Permite la evacuación mediante vehículos ligeros. Es la solución aplicada en el túnel del Canal de La Mancha.
- Punto de parada preferente, donde se garantizan unas condiciones de seguridad para alojar a los pasajeros de un tren hasta su rescate por una composición de emergencia.
- Galerías de acceso intermedio a lo largo de la longitud de los túneles, lo que a efectos prácticos para la operativa de seguridad supone una disminución de la longitud del túnel. Similares características presentan los pozos de acceso verticales.
- Estaciones multifuncionales en el interior de los túneles. Conjugan los conceptos de galería de seguridad y emergencia con la existencia de puntos seguros y están conectados con el exterior a través de galerías o pozos de acceso intermedio. Estas estaciones suelen permitir cambiar de túnel a los trenes y suelen incorporar equipos de ventilación. Los grandes proyectos de túneles de base alpinos alcanzan, en este sentido, el máximo grado de desarrollo.

A continuación se muestra una tabla comparativa de las medidas de seguridad más importantes adoptadas por los túneles analizados:

MEDIDAS DE SEGURIDAD ADOPTADAS POR LOS TÚNELES ESTUDIADOS										
Túnel	Longitud (km)	Nº Tubos	Separación entre ejes de tubos (m)	Separación galerías de conexión (m)	Galería de servicio	Nº Túneles de evacuación	Nº Pozos acceso	Máxima distancia a zona segura (km)	Nº Puntos de parada preferente	Nº Estaciones multifuncionales
St. Gotthard	57.0	2	40	325	no	2	1	10	2	2
Brennero	55.0	2	70	333	no	3	0	10	3	3
Seikan	53.9	1	30	600	sí	2	0	12	2	2
Mont D'Ambin	53.1	2	30	400	no	4	0	14	3	1
Eurotúnel	50.5	2	30	375	sí	0	0	25.2	0	0
Lötschberg	34.6	2*	40	333	no	3	0	12	1	0
Guadarrama	28.4	2	30	250	no	0	0	12.2	1	0
Pajares	24.9	2	50	400	no	2	0	7.1	1	0

Tabla 4.1. Medidas de seguridad adoptadas por los túneles a estudio. Fuente: elaboración propia

4.3. ESQUEMAS FUNCIONALES Y ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS DE SEGURIDAD ADOPTADAS POR LOS TÚNELES ANALIZADOS

4.3.1. Túnel de base del Gotardo

- *Esquema funcional*

El túnel consiste principalmente en dos tubos de vía única con dos estaciones multifuncionales que, por un lado realizan la función de parada preferente, y por el otro permiten a los trenes cambiar de túnel. La estación de Faido está dotada con un túnel de acceso que permite la evacuación de los pasajeros en caso de emergencia grave. La estación de Sedrun, en cambio, está dotada de un pozo de acceso que desempeña la misma función. La figura 4.1 ilustra el esquema funcional del túnel de base del Gotardo.

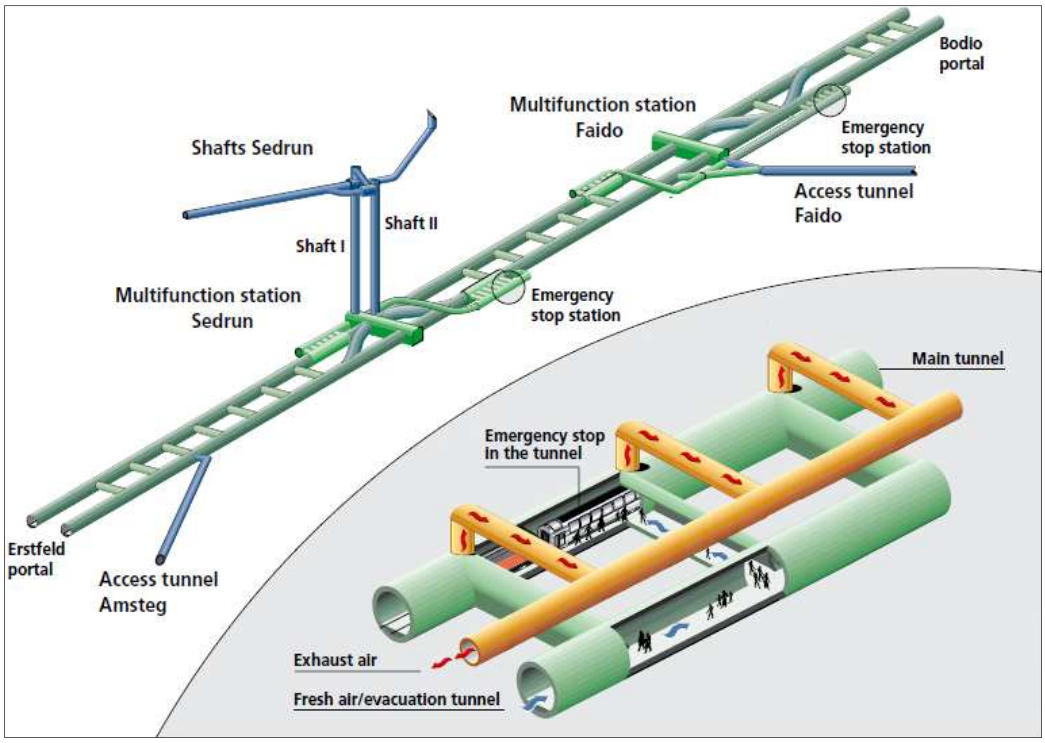

Figura 4.1. Esquema funcional del túnel de base del Gotardo. Fuente: [2]

El túnel de acceso de Armsteg, por donde empezaron a perforar dos TBM's, se ha aprovechado como túnel de acceso al finalizar la fase constructiva.

- *Plan de evacuación*

En caso de incendio en un tren de pasajeros, el procedimiento de salvamento depende de la posición del tren. Tres casos se deben tener en cuenta:

- El tren se encuentra en la última sección del túnel: el tren debe alcanzar la boca de salida y detenerse al aire libre.
- El tren se encuentra en la primera o en la segunda sección del túnel: el tren debe alcanzar la siguiente estación multifuncional y detenerse en el punto de parada preferente. Los pasajeros acceden a la zona de refugio en unos 3-5 min. Antes de llegar el tren, después de la activación de la alarma de incendios, las luces de la estación de emergencia se encenderán, las puertas de las vías de escape se abrirán automáticamente y el sistema de ventilación comenzará a extraer el humo del túnel accidentado hacia las 7 válvulas de mariposa antiincendos. Los pasajeros deberán esperar en el refugio de emergencia del túnel opuesto al accidentado, hasta que llegue el tren de emergencia. No se evacúa por los pozos de Sedrun ni por los túneles de acceso.
- Se produce un incendio y el tren no es capaz de llegar al siguiente punto de parada preferente o a la salida del túnel. En este caso el tren se detiene en cualquier punto y la evacuación tiene lugar. Los pasajeros podrán circular por plataformas de 1 m de ancho hasta llegar a la siguiente galería transversal y alcanzar el otro túnel. En el otro túnel la velocidad de los trenes se reduce una inmediatamente después de la activación de la alarma, minimizando el riesgo de atropello. En este caso el proceso de rescate externo procede de la misma forma que en el caso anterior.

Las galerías transversales están dotadas de puertas resistentes al fuego que ofrecerán protección antiincendios para las vías de escape.

En casi cualquier accidente un tren de evacuación será capaz de llegar al punto accidentado en 35-45 min, la evacuación de los pasajeros se completará en 90 min como máximo.

- *Sistema de ventilación*

El sistema de ventilación del túnel de base del Gotardo permite la extracción de humo en 7 ubicaciones diferentes en cada una de las dos estaciones de emergencia, para asegurar la calidad suficiente del aire, de la temperatura y de las condiciones de visibilidad en caso de que se produzca un incendio y sea necesaria la evacuación de los pasajeros. En la figura 4.2 se esquematiza el sistema de ventilación de la estación multifuncional de Sedrun.

Para permitir una evacuación eficiente y segura de los pasajeros, se requiere extraer el aire viciado cercano al fuego y proporcionar aire fresco a cierta presión desde las vías de escape y desde el tubo no accidentado. Los ventiladores principales (2x2,6 MW para extracción y 2x0,5 MW para impulsión) se instalarán en la planta de ventilación situada cerca del portal del acceso intermedio de Faido y en la planta de ventilación en la caverna sobre el pozo de Sedrun. El caudal de aire impulsado y extraído será de 200 m^3/s y 250 m^3/s, respectivamente. En cada estación de emergencia siete válvulas de mariposa antiincendios y seis puertas de seguridad corredizas completan el sistema de ventilación.

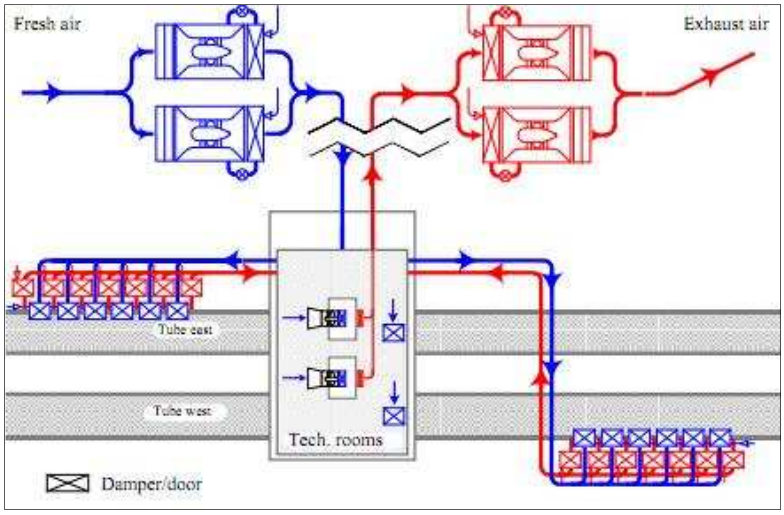

Figura 4.2. Sistema de ventilación de la estación multifuncional de Sedrun. Fuente: [13]

4.3.2. Túnel de base del Brennero

- *Esquema funcional*

El túnel del Brenero consiste en dos tubos separados 70 m entre sí. Cada tubo está equipado con vía única, por lo que el tráfico de mercancías (principalmente) circulará en un solo sentido por tubo. Los dos tubos están conectados con galerías transversales cada 333 m, que servirán como vías de escape en caso de emergencia. El túnel conectará con el bypass ferroviario de Innsbruck. Un nuevo túnel de evacuación se está construyendo paralelo al bypass.

Una característica peculiar del túnel es la existencia de un túnel de reconocimiento a lo largo de toda la longitud de los túneles principales. Este túnel se encuentra entre los dos túneles principales y unos 12 m por debajo de ellos, como se aprecia en la figura 4.3. Tiene un diámetro de 5 m. Este túnel resultará esencial para el drenaje cuando el túnel de base se encuentre operando.

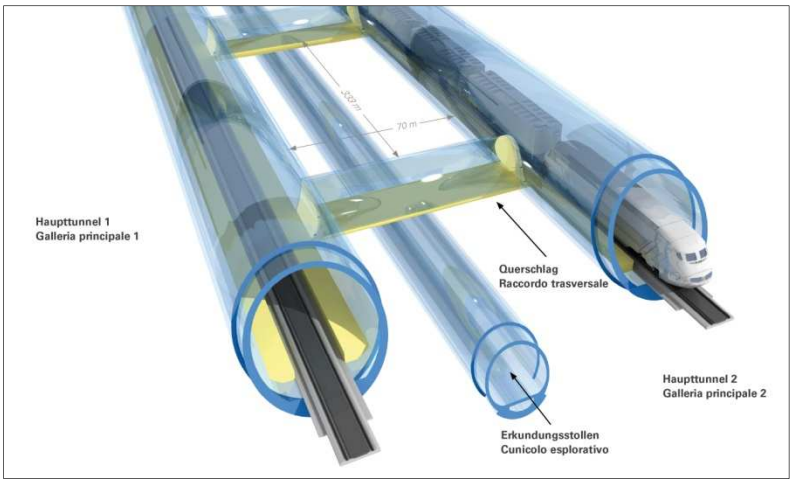

Figura 4.3. Sección de los túneles principales del Brennero y del túnel de reconocimiento. Fuente: [B]

Los trenes podrán cambiar de túnel en las tres estaciones multifuncionales planificadas en Innsbruck, Steinach y Prati. Estas estaciones, no separadas más de 20 km entre ellas, también estarán dotadas de equipos de ventilación, sistemas de seguridad y de dos estaciones de emergencia directamente conectadas con túneles de acceso. En la figura 4.4 se muestra el esquema funcional del túnel.

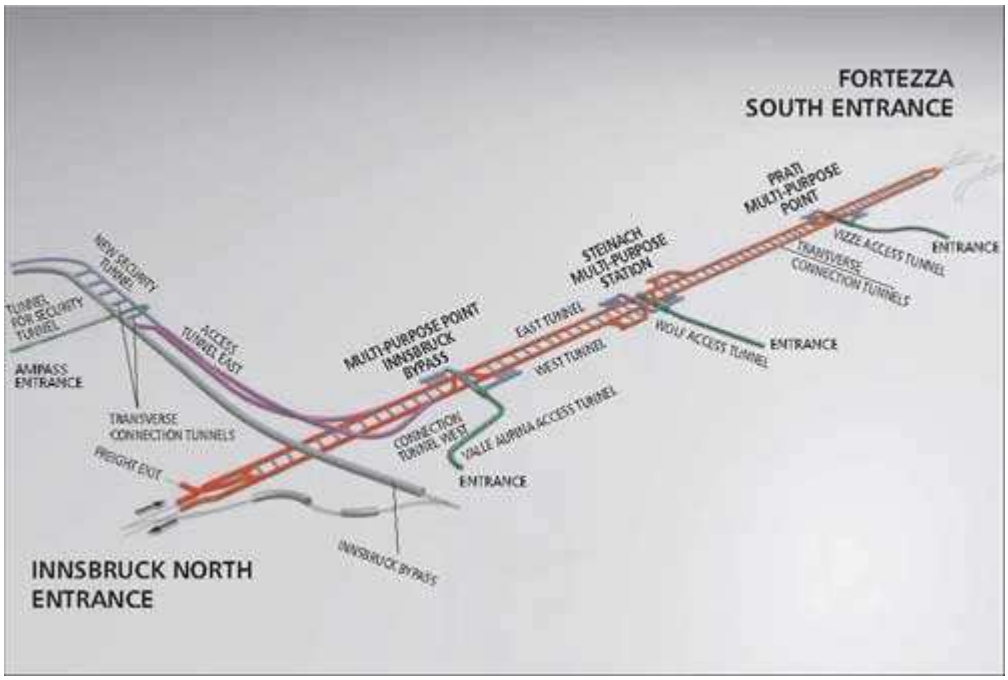

Figura 4.4. Esquema funcional del túnel del Brennero. Fuente: [B]

El túnel está dotado de tres túneles de acceso, uno por cada estación multifuncional: el túnel de acceso de Valle Aupina para la estación de Innsbruck, el túnel de acceso de Wolf para la estación de Steinach y el túnel de acceso de Vizze para la estación de Prati. Las estaciones de emergencia pueden ser evacuadas mediante vehículos motorizados desde estos accesos. Adicionalmente, la estación de Steinach dispone de doble vía para permitir el paso de los trenes en caso de emergencia.

4.3.3. Túnel de Seikan

- *Esquema funcional*

El túnel de Seikan está provisto de 3 túneles, como puede apreciarse en la figura 4.6:

- Túnel principal: túnel de vía doble de 53,85 m de largo.
- Túnel de servicio: construido a 30 m del túnel principal y unido a éste mediante galerías transversales cada 600 m, desempeña la función de pasaje alternativo por el que pueden circular vehículos motorizados.
- Túnel de reconocimiento: actualmente se utiliza para drenaje y ventilación.

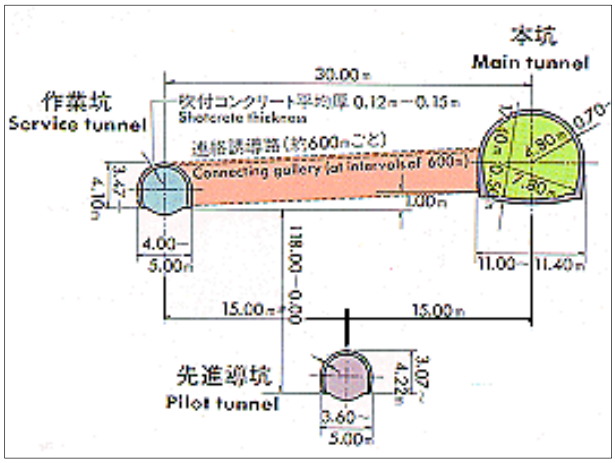

Figura 4.6. Sección transversal de los 3 túneles que forman parte del túnel de Seikan. Fuente: [I]

El túnel dispone también de dos estaciones multifuncionales: Tappi-Kaitei Station y Yoshioka-Kaitei Station, como se aprecia en el perfil longitudinal de la figura 4.5. Ambas estaciones están dotadas de un punto de parada preferente y permiten la evacuación en caso de emergencia a través de galerías de evacuación. La efectividad de las galerías de evacuación se ve mejorada por la instalación de ventiladores de extracción de humos, cámaras de televisión para guiar a los pasajeros y sistemas de alarmas térmicas con rociadores.

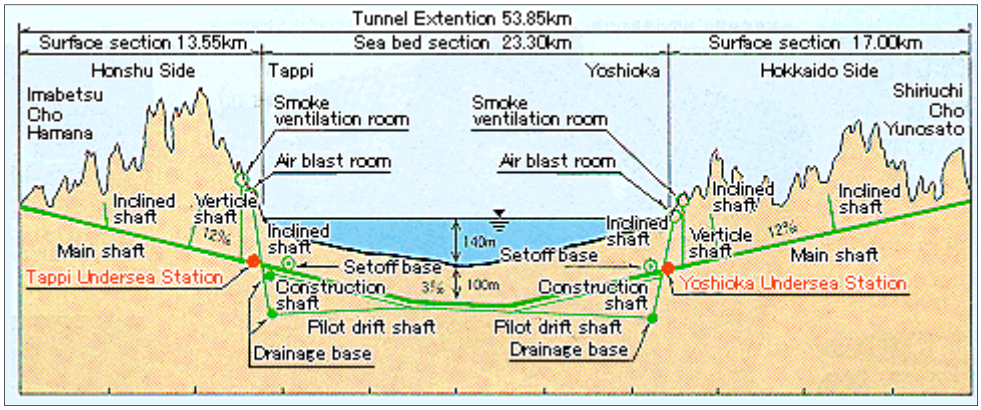

Figura 4.5. Perfil longitudinal del Túnel de Seikan. Fuente: [I]

4.3.4. Túnel de base de Mont d'Ambin

- *Esquema funcional*

El túnel está provisto de 3 puntos de parada preferente, equiespaciados a lo largo de la longitud del túnel, localizados en el pié de La Praz, en la zona central y al final de la galería de emergencia de Maddalena (túnel de reconocimiento de 13 km), tal y como ilustra el esquema funcional de la figura 4.7. Los puntos de parada preferente estarán dotados de los siguientes servicios:

- Refugio de emergencia para los pasajeros.
- Sistema de extracción de humos y antiincendios.
- Túneles de acceso para los servicios de emergencia y para la rápida evacuación de los pasajeros hacia la superficie.

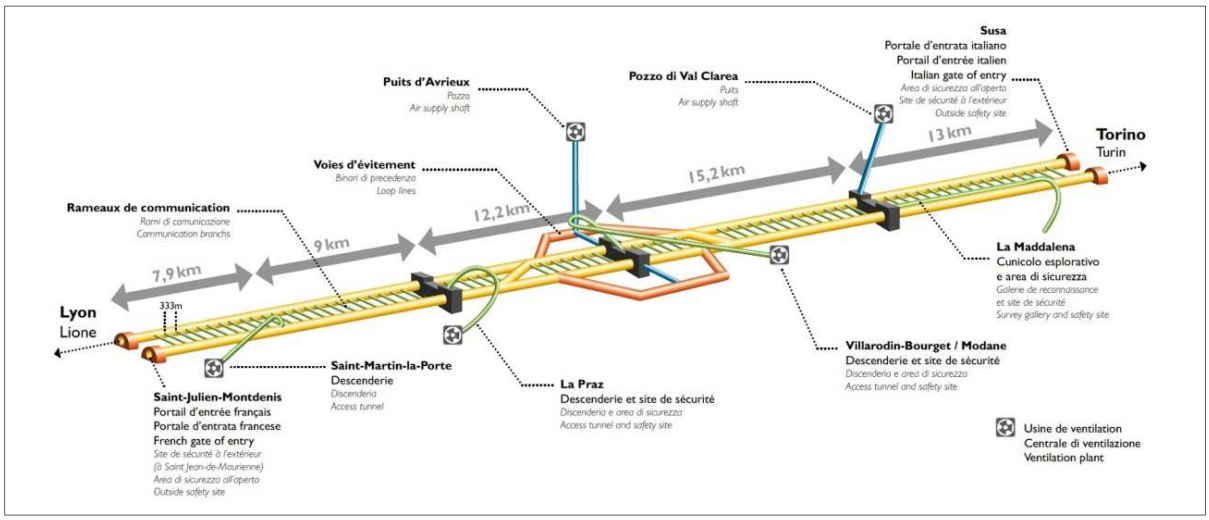

Figura 4.7. Esquema funcional del túnel de Mont d'Ambin. Fuente: [A]

Las dos bocas (Saint-Jean de Maurienne y Susa) estarán dotadas de bases con personal de emergencia y trenes de evacuación estacionados permanentemente. Los equipos de emergencia dispondrán de vehículos motorizados para acceder al túnel si fuera necesario.

- *Procedimiento de evacuación*

En caso de accidente o si se produce un incendio, los trenes de pasajeros continuarán la marcha, siempre que sea posible, hasta llegar a la salida o a al siguiente punto de parada preferente. Los pasajeros podrán esperar a los equipos de emergencia en los refugios de emergencia. Si el tren es incapaz de llegar al punto de parada preferente, los pasajeros serán evacuados hacia el otro túnel a través de las galerías transversales, tal y como muestra la figura 4.8, dónde esperarán a un tren especial que les llevará a la superficie.

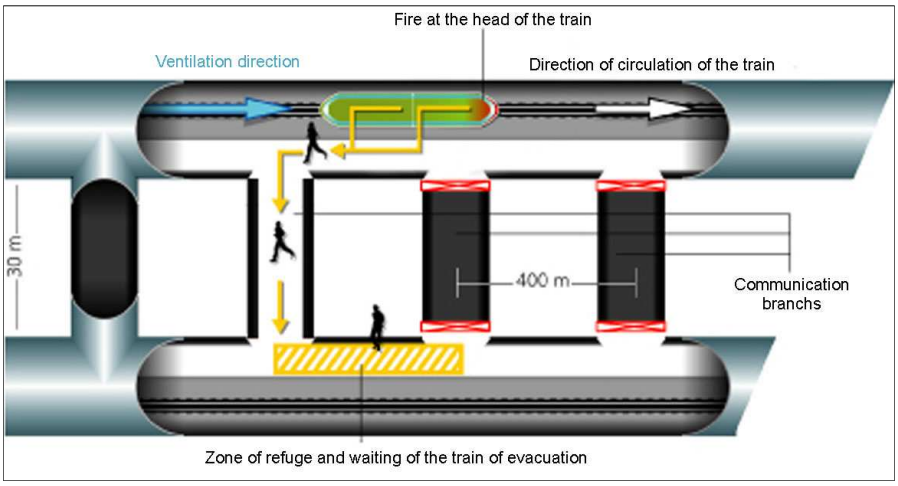

Figura 4.8. Procedimiento de evacuación en caso de incendio en el túnel de Mont d'Ambin. Fuente: [A]

- *Sistema de ventilación*

Bajo condiciones operativas normales, la ventilación del túnel se asegurará con un sistema de émbolo consecuencia del propio movimiento de los trenes. Esto será suficiente para renovar el aire en el interior del túnel y reducirá la temperatura interior hasta los 28-30 °C (la temperatura de la roca varía entre 45-50 °C).

El sistema de ventilación se basa en 4 plantas de ventilación, situadas en el túnel de acceso de St Martin la Porte, en el túnel de acceso de La Praz, en el pozo de ventilación de Avrieux y en el pozo de ventilación de Val Clarea.

Cada una de las 4 plantas estará equipada con un conjunto de ventiladores capaces de impulsar aire en el túnel y de extraer aire/humo cuando sea necesario. En caso de incendio en un túnel incapaz de llegar a un punto de parada preferente, el sistema de ventilación asegurará unas condiciones aceptables para la evacuación de los pasajeros en términos de temperatura, visibilidad y toxicidad.

4.3.5. Eurotúnel

- *Esquema funcional*

El Túnel del Canal de la Mancha dispone de dos túneles principales de vía única y de un túnel de servicio de 4,80 metros de diámetro, tal y como muestra la figura 4.9. Los tres túneles se encuentran conectados mediante galerías transversales cada 375 m. El túnel dispone de dos puntos de cambio de túnel para los trenes situados a un tercio de la longitud total desde cada entrada.

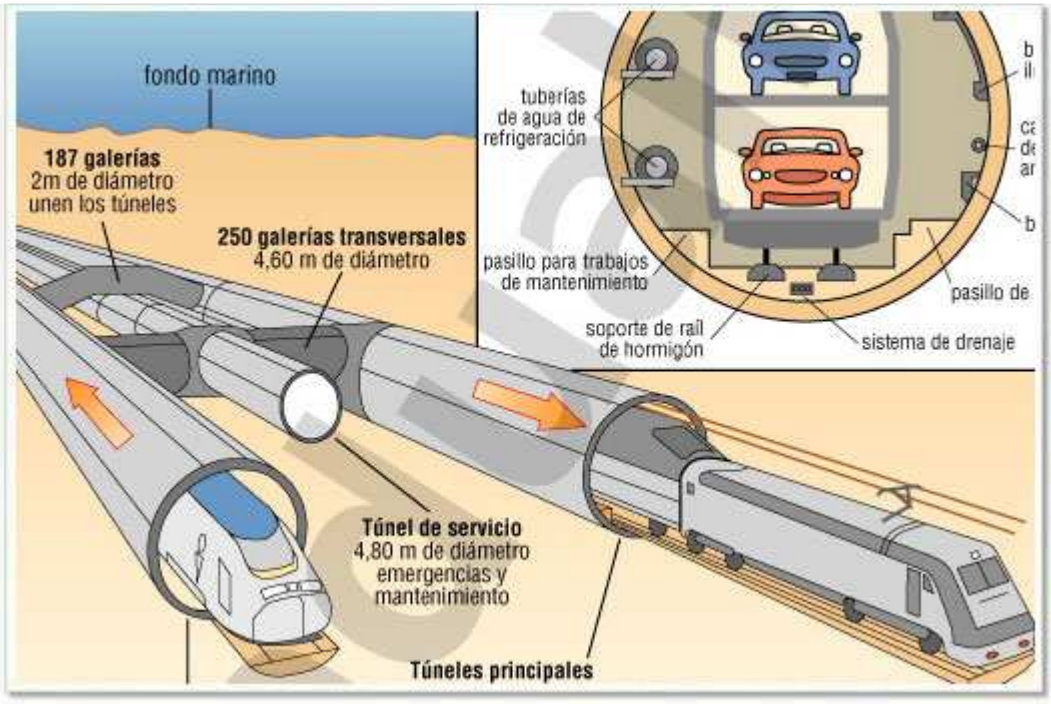

Figura 4.9. Sección transversal de los túneles principales y del túnel de servicio. Fuente: [D]

El túnel de servicio se usa para el acceso al equipo técnico de las galerías transversales y de los refugios de emergencia, para ventilación y como vía de evacuación en caso de emergencia. The Service Tunnel Transport System (STTSS) permite un acceso rápido a todas las zonas del túnel. Los 24 vehículos que circulan por el túnel de servicio tienen neumáticos y van guiados por un cable enterrado a un máximo de 80 km/h.

- *Plan de evacuación*

En caso de que se produzca un incendio en el tren la primera reacción debe ser trasladar a los pasajeros del vagón afectado a los vagones adyacentes y entonces aislar el fuego cerrando las puertas antiincendios. El tren no se debe detener. Al llegar a la estación de destino, el tren incendiado se detendrá en un lugar especialmente diseñado para la evacuación y el apagado del incendio evitando la afección al resto del tráfico. [16]

En el caso de no poder alcanzar las estaciones destino, el tren se detendrá en el interior del túnel. En esta situación se abrirán las puertas de las galerías transversales más próximas al lugar de parada y los pasajeros pasarán al túnel de servicio donde serán evacuados mediante los STTS.

- *Sistema de ventilación*

Los tres túneles contienen 6000 toneladas de aire que necesita ser acondicionado par razones de salud y confort. El aire es suministrado por dos edificios de ventilación situados en Shakespeare Cliff y Sangatte, cada uno capaz de suministrar el aire necesario para acondicionar adecuadamente los tres túneles de forma autónoma. En caso de emergencia, la ventilación expulsa el aire del túnel de servicio y mueve el humo del incendio en una dirección en el túnel principal para aportar aire limpio a los pasajeros.

Los equipos de tracción y la fricción generan calor. La temperatura límite de diseño son 30 °C y se consigue mediante equipos de refrigeración constituidos por plantas de refrigeración en el lado francés y en el inglés y por tuberías que transportan agua fría.

4.3.6. Túnel de base de Lotschberg

- *Esquema funcional*

El túnel de Lotschberg fue concebido como un túnel de doble tubo de vía única pero por problemas de costes, a día de hoy solo un tubo se ha completado al 100%, mientras que el otro solo está completamente equipado para el paso de trenes en los 11,7 km de su parte sur. En el esquema funcional de la figura 4.10 se puede apreciar como en la zona central tan sólo se dispone de un túnel con tráfico ferroviario.

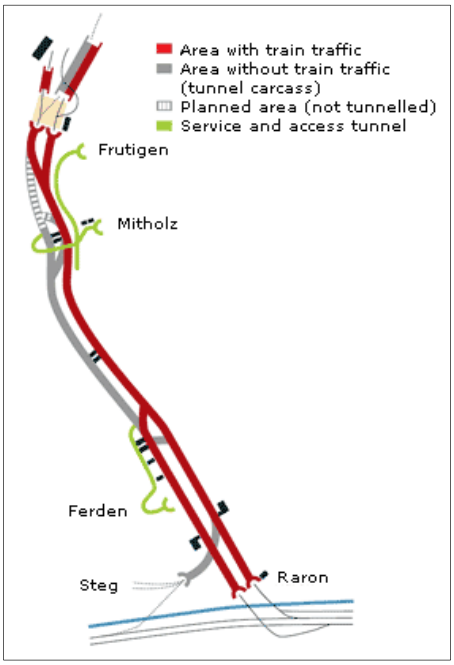

Figura 4.10. Esquema funcional del túnel de base de Lotschberg. Fuente: [G]

El túnel está dotado de una zona de parada preferente situada cerca de la villa de Ferden. Esta zona de parada preferente tiene salida al exterior a través de un túnel de evacuación dotado con suministro de aire fresco, extracción de humos, sistema de megafonía, video monitores y luces de alta intensidad.

Además del túnel ferroviario, el túnel de base de Lotschberg contiene una red de carreteras de unos 30 km de longitud. Esta red está formada por la galería de servicio de Kandertal, por dos túneles de acceso (Mitholz y Ferden) y por el tramo de túnel inacabado. Disponer de una red de estas características permite realizar faenas de mantenimiento sin entorpecer la circulación de trenes, así como evacuar a los pasajeros mediante buses en caso de emergencia.

- *Plan de evacuación*

En el caso de que se produzca un incendio en un tren que se encuentre circulando por el interior del túnel hay tres procedimientos de evacuación a seguir, dependiendo de la situación:

- El tren intentará alcanzar la estación de servicio de Mitholz o la estación de emergencia de Ferden. La estación de servicio de Mitholz puede desempeñar la función de estación de rescate en caso de emergencia. Una plataforma de unos 440 m permitiría la evacuación de los pasajeros del tren, que deberían posteriormente alcanzar la galería de reconocimiento de Kandertal y desde allí serían evacuados mediante buses. La estación de emergencia de Ferden, en cambio, está dotada de dos estaciones de tren de 450 m, una por túnel. En caso de parada de emergencia, los pasajeros podrán acceder al refugio situado entre los dos túneles a través de las 6 galerías de escape existentes. La evacuación de los pasajeros se realizará por tren a través del túnel seguro. La galería de Ferden permite además, el acceso de ambulancias en caso de necesidad de evacuar con urgencia a heridos.
- En el caso en que el tren haga una parada de emergencia al sur de la estación de emergencia (zona con los dos túneles 100% operativos), la evacuación de los pasajeros tendrá lugar a través de las galerías transversales que comunican ambos túneles. Otro tren transportará a las víctimas al exterior a través del túnel seguro.
- En el caso de parada de emergencia al norte de la estación de emergencia (zona con tan solo un túnel 100% operativo para la circulación de trenes), la evacuación de los pasajeros tendrá lugar a través de las galerías transversales que comunican ambos túneles. En este caso la evacuación se realizará mediante buses circulando por el túnel oeste.

- *Sistema de ventilación*

El túnel dispone de 3 instalaciones de ventilación, dos instalaciones de suministro de aire fresco y una de extracción de humos.

Las dos instalaciones de suministro de aire están situadas en Mitholz (150 m^3/s) y en Ferden (200 m^3/s) y tienen la función de suministrar aire fresco en caso de no haber tráfico de trenes.

En caso de accidente o durante las tareas de mantenimiento, la estación extractora (situada cerca de la sección de Ferden) puede extraer aire contaminado y humos desde el túnel ferroviario y expulsarlo al exterior a través de pozo de ventilación de Fystertella.

4.3.7. Túnel de Guadarrama

- *Esquema funcional*

Las principales instalaciones de seguridad del túnel de Guadarrama son las siguientes:

- Doble túnel de vía única con una distancia de separación entre ejes de 30 m.
- Para compensar la supresión de la galería de evacuación inicialmente proyectada, las galerías de conexión entre ambos tubos se han construido cada 250 m, en vez de cada 450 m como esta inicialmente previsto, y están dotadas de puertas de apertura asistidas y presurizadas.
- Andén lateral de evacuación en toda la longitud de ambos túneles de 1,70 m de ancho, con alumbrados y pasamanos.
- Sala de emergencia, aproximadamente en la mitad del túnel, con una superficie aproximada de 2500 m^2.
- Dos centros de control relacionados entre sí (uno principal y otro esclavo) desde los que se podrá actuar sobre las instalaciones con sistema autónomo durante 4 días.

En la figura 4.11 se muestra el esquema funcional del túnel de Guadarrama.

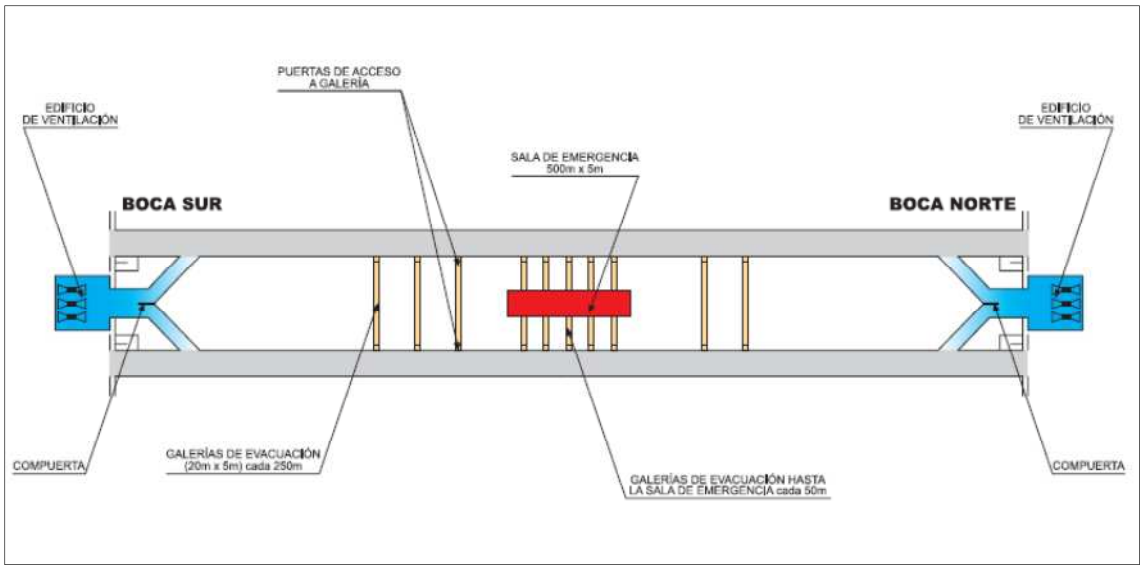

Figura 4.11. Esquema funcional del túnel de Guadarrama. Fuente: [E]

- *Plan de evacuación*

En caso de producirse un incendio, la estrategia más elemental indica que el tren debe salir del túnel si le es posible. Si no lo fuera, debe parar frente a la sala de emergencia si está a tiempo de ello y, en caso contrario, parar en cualquier punto para iniciar la evacuación de las personas hacia las galerías transversales más próximas.

En caso de que fuera necesaria la evacuación de un tren detenido en el interior del túnel, se paralizará el tráfico en ambos túneles desde el control de tráfico centralizado. Las puertas de las galerías transversales más próximas (4-6) se desbloquearán para permitir el paso de los pasajeros al túnel seguro, dónde serán rescatados por un tren de evacuación.

- *Sistema de ventilación*

En ambas bocas, Miraflores de la Sierra (sur) y Segovia (norte), se ubican sendos edificios o estaciones de ventilación, cada una de las cuales aloja tres ventiladores reversibles con la potencia suficiente para resolver las diversas situaciones posibles aunque uno de ellos esté averiado. Desde cada estación de ventilación se puede:

- Insuflar aire en cualquiera de los túneles para crear o reforzar la circulación de aire y, fundamentalmente, para controlar o mover los humos que pudieran tener en caso de incendio.
- Insuflar aire en el túnel sano evitando la contaminación de humos desde el otro túnel. Este sistema constituye, junto con las galerías de conexión, el núcleo de la seguridad frente a situaciones de fuego. En efecto, cada túnel se convierte en una galería de seguridad en caso de accidente en el otro.

El sistema de ventilación se utiliza fundamentalmente en caso de incendio. En condiciones normales, se espera una circulación de aire en el mismo sentido que los propios trenes.

4.3.8. Túneles de Pajares

- *Esquema funcional*

Los túneles de base de Pajares se aproximan a la filosofía de los túneles alpinos, puesto que constituyen un auténtico entramado de obras subterráneas, tal y como se ilustra en el esquema funcional de la figura 4.12, que constan de los siguientes elementos:

- Dos túneles principales de 25 km de longitud, separados una distancia mínima de 50 m entre ejes.
- Galerías de conexión entre los túneles principales cada 400 m.
- Un punto de parada preferente hacia la mitad del túnel, pensado para facilitar el desalojo de un tren, en caso de incidencia grave, y disponer de un espacio seguro para recoger a los viajeros y esperar hasta su evacuación, con otro tren que acudirá en su ayuda. Su esquema pretende, mediante galerías transversales cada

50 m, facilitar la salida de los viajeros del tubo siniestrado y conducirlos a una zona segura.

- Dos galerías de acceso intermedio. La galería de Folledo, de 2 km de longitud, se encuentra entre el punto de parada preferente y la boca sur, y la galería de Buiza, de 5,5 km de longitud, que permite la evacuación desde el punto de parada preferente en caso de emergencia grave.

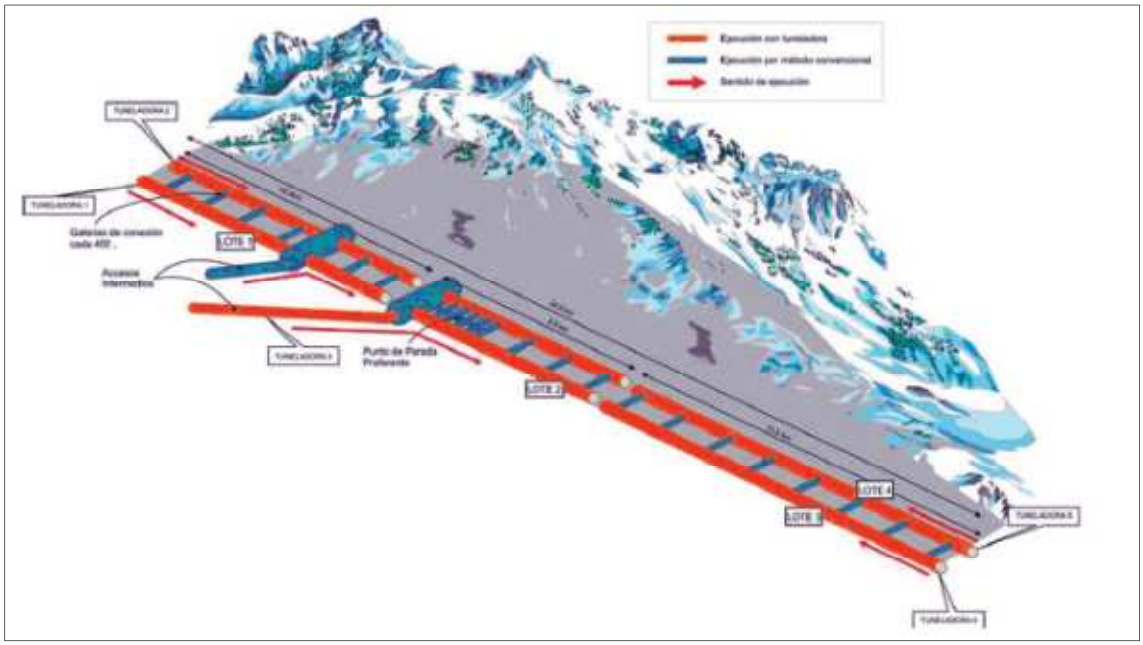

Figura 4.12. Esquema funcional del túnel de Pajares. Fuente: [3]

- *Plan de evacuación*

La seguridad en el túnel se plantea siguiendo unas hipótesis de trabajo para los casos de incidencia que, por orden de preferencia, son las siguientes:

- El tren procura no parar en el interior del túnel: no entrando (si puede parar al detectar la incidencia antes de llegar al túnel) o saliendo del mismo (si puede hacerlo, en caso de detectarla en el interior).
- El tren para en el Punto de parada preferente, si el conductor piensa que no puede llegar al exterior.
- El tren para en cualquier punto del túnel, si no son posibles las situaciones anteriores.

Para las dos últimas situaciones, el túnel debe estar dotado de la infraestructura e instalaciones necesarias para la seguridad de los viajeros. Estos serán evacuados del tren y conducidos a una zona segura, donde deberán esperar la llegada de otro tren que los traslade fuera del túnel. Nunca los viajeros deberán buscar la salida al exterior caminando por el túnel, de manera incontrolada.

4.4. ZONAS EXTERIORES

Los grandes túneles ferroviarios requieren, a diferencia de los túneles tradicionales y por motivos de seguridad en fase de explotación, de un conjunto de instalaciones permanentes en el exterior. A continuación se presentan las de mayor importancia:

- Punto de Adelantamiento y Estacionamiento de Trenes (PAET). Permite la detención de un tren antes de entrar al túnel sin afectar a la circulación de otros trenes.
- Subestaciones eléctricas y otros cuartos técnicos (instalaciones de seguridad, señalización, etc.).
- Superficie capaz de albergar a los pasajeros de un tren (se puede considerar un máximo de 1.000 personas).
- Buenos accesos por carretera, especialmente para los vehículos de intervención en casos de emergencia, por lo tanto que el firme debe soportar el tráfico de vehículos pesados.
- Centro de control del túnel. En cada boca debe haber un centro de control del túnel desde el que se haga un seguimiento del funcionamiento de las instalaciones, tanto en caso de explotación normal como en caso de emergencia, pero no es imprescindible que esté situado en las inmediaciones del túnel, sino que puede estar situado a cierta distancia y ser el centro de control de varios túneles de la misma línea.
- Será necesario construir un helipuerto, sobre todo, en zonas aisladas lejanas a grandes ciudades, o con complicado acceso por carretera. Muy útil para la rápida evacuación de heridos graves.

Estas instalaciones requieren, por lo general, menor superficie que la necesaria para las instalaciones provisionales de obra. Por esta razón, conviene estudiar conjuntamente ambas necesidades en la fase de Proyecto.

5. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE CARÁCTER SOCIOECONÓMICO

5.1. BREVE ANÁLISIS DE LOS COSTES GENERALES

La excavación de un túnel de más de 20 km de longitud es un desafío financiero para cualquier país. La fase de diseño de este tipo de obras se prolonga más de lo habitual, por la necesidad de contemplar un espectro de riesgos muy amplio. La construcción moviliza un número muy elevado de recursos humanos y materiales, cuya logística suele tener impacto a nivel regional, tornando compleja y costosa la explotación de la infraestructura.

Con ánimo de cuantificar los costes anteriormente descritos se presenta la tabla 5.1, en la que se muestran los costes finales (en los túneles en servicio) y los costes previstos (en los túneles en fase de construcción/diseño) de los 8 túneles ferroviarios estudiados.

COSTES DE LOS TÚNELES ESTUDIADOS			
Túnel	Longitud (km)	Costes ejecución (millones euros)	Costes/km (millones euros/km)
St. Gotthard	57.0	7900*	139
Brennero	55.0	9700*	176
Seikan	53.9	2700	50
Mont D'Ambin	53.1	7800*	147
Eurotúnel	50.5	16000	317
Lötschberg	34.6	3400	98
Guadarrama	28.4	1220	43
Pajares	24.9	1400	56

Tabla 5.1. Costes de los túneles ferroviarios de gran longitud estudiados.
Fuente: elaboración propia

Los costes absolutos de este tipo de obras, oscilan entre los 1220 millones de euros del túnel de Guadarrama y los 16000 millones del túnel del Canal de la Mancha. En cuanto a costes por kilómetro, la horquilla se mueve entre los 43 y los 317 millones de euros por km, con una media de 128 millones de euros por km.

Se observa una clara tendencia al incremento del coste por km con la longitud, ya que a mayor longitud, mayor incertidumbre geológica, mayor probabilidad de encontrar zonas de mala calidad y mayores dimensiones presenta el complejo subterráneo del túnel.

Conviene matizar los resultados obtenidos para el túnel de Seikan y para el Eurotúnel. El bajo coste por km del túnel de Seikan es debido a que presenta una solución monotubo y además no es apto para trenes de alta velocidad, como en el caso de los otros túneles estudiados. El Eurotúnel, en cambio, presenta un coste muy superior al resto, causado por la dificultad técnica que supone construir un túnel de tales

características bajo el mar en un breve plazo de tiempo y a las dificultades de coordinación entre las empresas contratadas.

Como se ha podido observar, los túneles ferroviarios de gran longitud llevan implícitos unos costes realmente elevados. Por ello, es necesario planificar adecuadamente la infraestructura, pensando en las velocidades futuras, para que pueda dar servicio durante toda su vida útil sin quedarse obsoleta.

5.2. BENEFICIOS OBTENIDOS POR LA EXPLOTACIÓN

El beneficio social que aportan los túneles ferroviarios de gran longitud es, básicamente, el de permitir la construcción de los exigentes trazados de alta velocidad a través de zonas montañosas o por debajo del mar (casos de Seikan y Eurotúnel). Estas líneas de alta velocidad buscan principalmente dos objetivos, por un lado reducir el tiempo de viaje, tanto para pasajeros como para mercancías, y por otro lado aumentar la capacidad de transporte de mercancías para así descongestionar las carreteras.

5.2.1. Reducción de tiempo de viaje

En cualquier proyecto de transporte el ahorro de tiempo de viaje constituye la fuente principal de beneficios sociales. Consecuentemente el valor que se asigne a la unidad de tiempo es determinante en los resultados de la evaluación [25].

Para suplir la falta de referencias nacionales resulta posible recurrir a la transferencia de valores internacionales. Tomando como fuente el caso de Europa, los resultados más completos y recientes se encuentran en los proyectos HEATCO y UNITE, donde se calcula el valor de los ahorros de tiempo a partir de diversos estudios dentro de la UE.

A modo de ilustración, en las tablas 5.2 y 5.3 se presentan los valores medios para Holanda, Suecia y Reino Unido, desglosándose por motivo de viaje para el transporte de pasajeros, y por tipo de vehículo o carga en el transporte de mercancías.

VALOR DEL TIEMPO EN TRANSPORTE FERROVIARIO DE PASAJEROS		
Motivo del viaje	Valor estimado por persona/hora (euros 1998)	Unidad de medida
Trabajo	21	coste de factores
Commuting/privado	6.4	precios de mercado
Ocio/vacaciones	4.7	precios de mercado

Tabla 5.2. Valor del tiempo en el transporte ferroviario interurbano de pasajeros. Fuente: [25]

VALOR DEL TIEMPO EN TRANSPORTE FERROVIARIO DE MERCANCÍAS		
Tipo de vehículo	Valor estimado (euros 1998)	Unidad de medida
Carga completa (por h)	725	coste de factores
Carga del vagón (por h)	30	coste de factores
Media por tonelada (por h)	0.76	coste de factores

Tabla 5.3. Valor del tiempo en el transporte ferroviario de mercancías. Fuente: [25]

La renovación de las antiguas líneas férreas a altas cotas, por líneas modernas de trazados más tendidos con túneles de gran longitud, puede comportar un ahorro de tiempo muy considerable. Para reforzar este argumento, se presenta, por un lado, la figura 5.1 en la que se ilustra el ahorro de tiempo logrado en la línea Zurich-Milán gracias al túnel de base del Gotardo, y por el otro, la tabla 5.4 en la que se muestra el ahorro de tiempo logrado en la nueva línea Berna-Milán (línea a la que pertenece el túnel de base de Lötschberg).

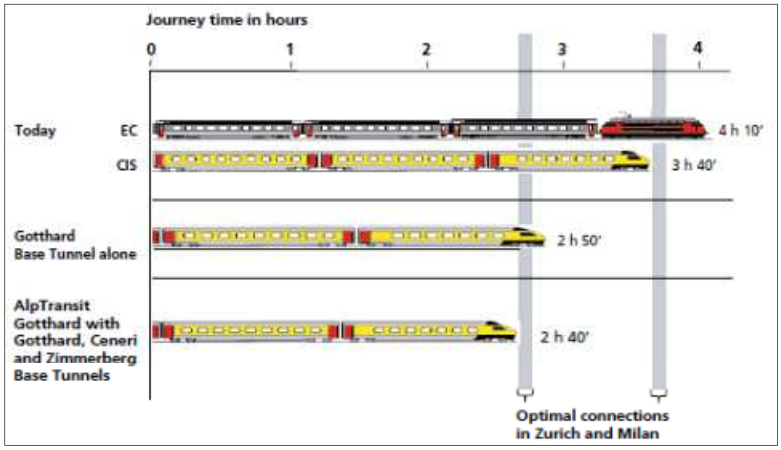

Figura 5.1. Tiempos de viaje para trenes de pasajeros entre Zurich y Milán en diferentes etapas del proyecto AlpTransit Gotthard. Fuente: [2]

Route	2005	2008	Time saved
Berne – Visp	1:57	0:55	1:02
Berne – Brig	1:38	1:04	0:34
Lucerna – Visp	3:11	2:06	1:05
Zurich – Sion	3:19	2:32	0:47
Zurich – Zermatt	4:24	3:19	1:05
Basel – Milano	4:35	~ 4:00	~ 0:35

Tabla 5.4. Tiempos de viaje para trenes de pasajeros entre diferentes paradas en la línea Berna-Milán. Fuente: [F]

5.2.2. Incremento de la eficiencia del transporte de mercancías

El tráfico de mercancías se ha incrementado enormemente en las últimas décadas en los países europeos. Este hecho ha provocado una importante congestión de sus principales carreteras. En la figura 5.2 se muestra el aumento del tráfico de mercancías a través de los Alpes, tanto por carretera como por raíl, en los países de Francia, Suiza y Austria, a lo largo de las últimas décadas.

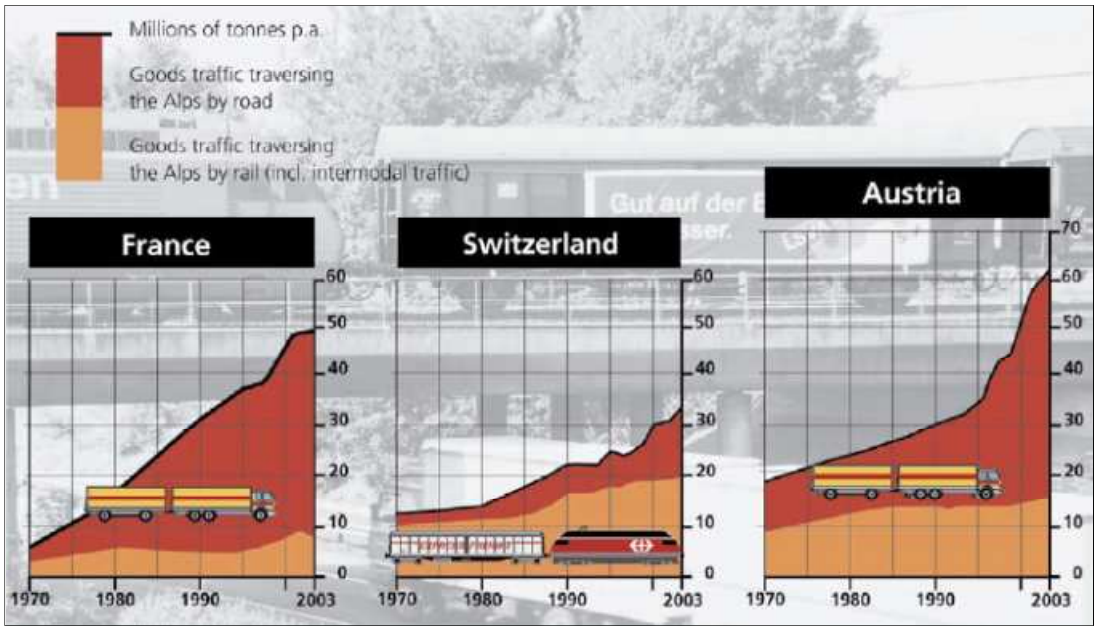

Figura 5.2. Comparativa entre Francia, Suiza y Austria de la evolución del tráfico de mercancías a través de los Alpes durante las últimas décadas. Fuente [2]

La gran mayoría de nuevas líneas ferroviarias de alta velocidad europeas se han diseñado para tráfico mixto, con la intención de absorber parte del tráfico de mercancías de las carreteras. Con estos proyectos se busca, por un lado, reducir los grandes problemas de saturación que sufren estas vías, y por otro, reducir los altos niveles de emisiones de gases nocivos a la atmósfera producido por el elevado tráfico de vehículos pesados.

Gracias a las nuevas velocidades alcanzadas por los trenes de mercancías en estas nuevas líneas (llegando a los 160 km/h), los trenes de carga no tendrán que parar con tanta frecuencia, o durante tanto tiempo, para dejarse adelantar por los trenes de pasajeros. Este hecho permitirá, además de reducir el tiempo de transporte, aumentar tanto la frecuencia de los trenes de mercancías como su longitud. La nueva línea a través del Gotardo, por ejemplo, permitirá pasar de los 150 trenes de mercancías que circulan por la línea actual, a más de 200 trenes por día de mayores longitudes. En la figuras 5.3 y 5.4 se ilustra el número de trenes por día que circulan actualmente por las dos líneas de Lötschberg y comparándolas se puede apreciar la notable mejora de servicio, tanto de pasajeros como de mercancías, que ha provocado la nueva línea de base.

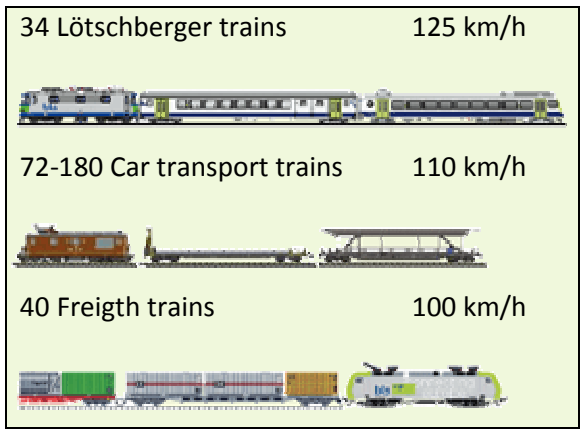

Figura 5.3. Número de trenes por día y sus velocidades en la antigua ruta de Lötschberg. Fuente: [F]

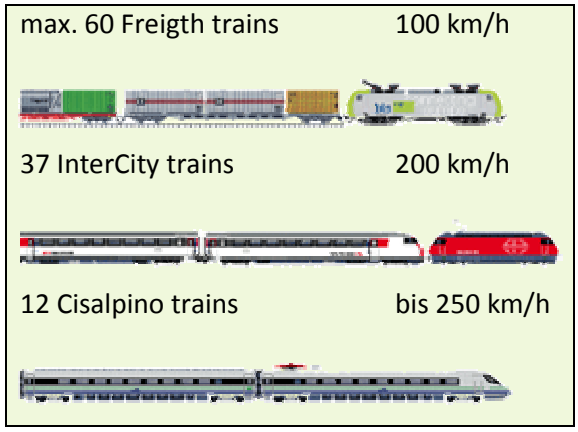

Figura 5.4. Número de trenes por día y sus velocidades en la nueva ruta de base de Lötschberg. Fuente: [F]

Las suaves pendientes y los radios generosos que incorporan los nuevos trazados permiten, además, o bien transportar la misma carga con menos potencia (ahorro energético), o bien aumentar el volumen de carga manteniendo el gasto energético (mayor productividad). Consecuentemente, en las nuevas líneas de alta velocidad circularán trenes de mercancías de nueva generación, con mejores prestaciones que los tradicionales. En la figura 5.5 se pueden apreciar las características más importantes de los trenes de mercancías que circularán por la nueva línea de base a través del Gotardo.

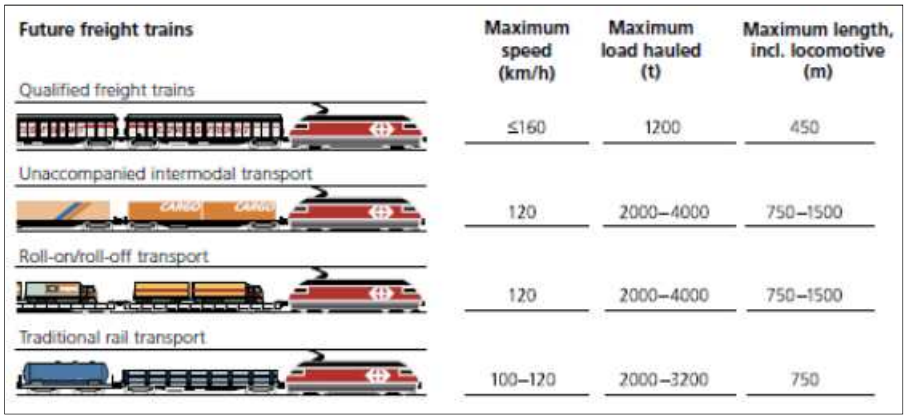

Figura 5.5. Características de los futuros trenes de mercancías que circularán por la nueva línea de base del Gotardo. Fuente: [2]

6. CONCLUSIONES

6.1. CONCLUSIONES RESPECTO A CRITERIOS DE DISEÑO

- El trazado de los túneles de gran longitud condiciona el trazado de la línea y no al revés, como ocurre en los túneles cortos.

- Es importante minimizar, en la medida de lo posible, la longitud de túnel continuo. Las dos importantes ventajas que se derivan de este hecho son, por un lado, la mejora de la seguridad en la construcción y explotación del túnel acortando la distancia a zona segura, y por otro, la reducción de plazo que supone el poder atacar el túnel por diversos frentes.

- Se debe minimizar la afección a zonas de alta riqueza medioambiental. Este aspecto es especialmente crítico durante la fase de construcción, ya que en fase de explotación los túneles son de las tipologías de obra civil que ocasionan un impacto ambiental menor.

- Los túneles de gran longitud estudiados presentan unos radios mínimos muy generosos. Este hecho es doblemente beneficioso, ya que permite la circulación a velocidades elevadas sin la necesidad de recurrir a grandes peraltes, lo cual favorece enormemente la buena conservación de la plataforma ferroviaria, reduciendo los costes de mantenimiento.

- Las pendientes máximas de los túneles de gran longitud objeto de estudio responden en general a criterios de tráfico mixto, respetando las Recomendaciones para el Proyecto de Plataforma de GIF que recomiendan valores no superiores a las 15 milésimas.

- Los fenómenos aerodinámicos que se producen al circular un tren por el túnel pueden superponerse y aumentar sus efectos en los túneles de vía doble cuando tiene lugar un cruce de trenes. Las consecuencias de estos fenómenos son especialmente críticas en los modernos túneles de gran longitud por las altas velocidades alcanzadas por los trenes. Evitar la superposición de efectos es uno de los motivos por los que se ha optado por la solución bitubo de vía única para este tipo de túneles.

- En los túneles de longitudes superiores a los 10 km, el incremento de la resistencia aerodinámica pasa a ser el fenómeno aerodinámico fundamental y en el que se debe centrar el diseño de la sección transversal de este tipo de túneles por ser más restrictivo que el criterio de confort empleado en los túneles cortos para limitar las variaciones de presión.

- La mayoría de túneles de gran longitud, en servicio o en construcción, tienen un diámetro entorno a los 8,5 metros, por lo que se deduce que no se ha tenido en consideración el criterio de resistencia aerodinámica a la hora de su diseño, ya que este ultimo criterio aconseja diámetros en el entorno de los 10-11 metros para poder alcanzar las velocidades de 300 km/h que permiten algunos trazados.

6.2. CONCLUSIONES RESPECTO A CRITERIOS CONSTRUCTIVOS

- Las incertidumbres geológicas aumentan cuanto mayor es la profundidad a la que se desarrolla el trazado del túnel; de igual modo, a mayor longitud del túnel, mayor es la probabilidad de encontrar zonas potencialmente problemáticas o fenómenos no previstos inicialmente. Consecuentemente, el coste de las campañas de reconocimiento aumenta con la longitud y la profundidad del túnel.

- Desde la terminación del enorme túnel de Seikan en Japón, ha tenido lugar un cambio en la forma de concebir la construcción de los grandes túneles. Este cambio de tendencia ha llevado a los túneles de gran longitud construidos a finales del siglo XX y principios del XXI a proyectarse en base a la utilización de las máquinas tuneladoras.

- La geotecnia no tiene hoy ninguna solución para garantizar la estabilidad del frente en un túnel abierto a gran profundidad. En consecuencia, los túneles de frente abierto y gran sección son, desgraciadamente, una fuente constante de hundimientos y colapsos de frente y contorno, tanto en suelos como en roca.

- Los rendimientos medios obtenidos por las TBM en los túneles de gran longitud estudiados superan sobradamente a los avances medios obtenidos actualmente por el NATM. Esta mejora de rendimientos provoca que a medida que aumenta el papel del las tuneladoras en la excavación de este tipo de túneles, los plazos de ejecución tiendan a reducirse.

- Los grandes avances tecnológicos en el campo de las TBM permiten perforar túneles a una velocidad y con una seguridad insospechada poco tiempo atrás. En consecuencia, parece justificado bajar rasantes en los trazados ferroviarios para obtener un menor número de túneles con longitudes mayores en los que sea económicamente viable el empleo de las TBM.

6.3. CONCLUSIONES RESPECTO A CRITERIOS DE SEGURIDAD

- En los túneles de gran longitud la seguridad se ha convertido en uno de los principales condicionantes del diseño, incrementando los costes de construcción notablemente. Este tipo de túneles han pasado a ser verdaderos complejos subterráneos dotados de la última tecnología en materia de seguridad.

- La configuración mínima para la explotación operativa de los grandes túneles es la de doble tubo de vía única, con galerías de conexión establecidas a una distancia suficiente para garantizar la evacuación del túnel accidentado en tiempos mínimos.

- Los grandes túneles están dotados sistemas de ventilación capaces de extraer el aire viciado e impulsar aire fresco hacia cualquier punto del túnel en caso de parada, puesto que en circulación normal es el propio movimiento de los trenes el que hace circular el aire a modo de émbolo.

6.4. CONCLUSIONES RESPECTO A CARACTERÍSTICAS DE CARÁCTER SOCIOECONÓMICO

- La excavación de un túnel de más de 20 km de longitud es un desafío financiero para cualquier país. La fase de diseño de este tipo de obras se prolonga en el tiempo por la necesidad de contemplar un espectro de riesgos muy amplio, la construcción moviliza un número muy elevado de recursos humanos y materiales, y la explotación de la infraestructura se torna muy compleja y elevadamente costosa.

- Se observa una clara tendencia a incrementar el coste por km con la longitud, ya que a mayor longitud, mayor incertidumbre geológica, mayor probabilidad de encontrar zonas de mala calidad y mayor complejidad del complejo subterráneo del túnel.

- El beneficio social que aportan los túneles ferroviarios de gran longitud es, básicamente, el de permitir la construcción de los exigentes trazados de alta velocidad a través de zonas montañosas o por debajo del mar.

- La renovación de las antiguas líneas férreas a altas cotas, por líneas modernas de trazados más tendidos con túneles de gran longitud, puede comportar un ahorro de tiempo muy considerable, tanto para los trenes de pasajeros como para los de mercancías.

- La gran mayoría de nuevas líneas ferroviarias de alta velocidad europeas se han diseñado para tráfico mixto. Con estos proyectos se busca, por un lado, reducir los grandes problemas de saturación que sufren estas vías, y por otro, reducir los altos niveles de emisiones de gases nocivos a la atmósfera producto de este aumento del número de vehículos pesados.

7. BIBLIOGRAFÍA

7.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] F. Vuilleumier, M. Aeschbach. *The Lötschberg Base Tunnel. Lessons Learned from the construction of the tunnel*. 1º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas. Seminário Internacional South American Tunneling.

[2] AlpTransit Gotthard Ltd. (2004). *The New Gotthard Rail Link*.

[3] M. Arlandi Rodríguez, M. L. Domínguez González, M. Peláez González. *Génesis del proyecto de Pajares. Estudios previos, Proyecto básico y Proyectos constructivos*. ADIF.

[4] M. Míguez Ballo (2005). *Los Túneles de Pajares*. Revista de Obras Públicas nº 3460.

[5] J. A. Cobreros Aranguren, F. Mendaña Saavedra, M. Moreno Cervera (2002). *Proyecto y construcción del Túnel de Guadarrama*. Revista de Obras Públicas nº 3426.

[6] Ponencia de Mario Peláez (6/11/03). *Proyecto de grandes túneles*. INECO.

[7] Michael Grant (1997). *Financing Eurotunnel*. Japan Railway & Transport Review.

[8] Proceedings of the Institution of Civil Engineers (1992). *The Channel Tunnel*. Vol. 102.

[9] A. López Pita (2006). *Infraestructuras ferroviarias*. Ediciones UPC.

[10] M. Melis, I. De Matías, J. M. Alonso, J. L. Navarro, J. L. Tasis (2001*). Diseño de Túneles para Trenes de Alta Velocidad. Rozamiento Tren-aire-túnel y Ondas de Presión*. Revista de Obras Públicas nº 3415.

[11] M. Stephen Slot Odgaard. *Presentation of the project Lyon-Turin Ferroviaire*.

[12] C. Díez, L. de la Rubia, R. Míguez. *La Excavación de los Túneles de Base de Pajares*. ADIF.

[13] D. Fabri. *The Gotthard base tunnel: Fire/life safety system*. The 6th annual Tunneling Conference Sydney 30th and 31th August 2004

[14] F. Vuilleurmier, A. Weatherill, B. Crausaz. *Safety aspects of railway & road tunnel: example of the Lotschberg Railway Tunnel & Mont-Blanc Road Tunnel*.

[15] Ch. Rudin, P. Reinke, A. Busslinger, B. Hagenah. *Ventilation and safety: Comparison of European base tunnels*.

[16] C. J. Kirkland. *The fire in the Channel Tunnel*.

[17] E. Alonso. "*Apuntes de la asignatura de Túneles*. Teoría 2ª Parte: Topos y escudos". UPC, E.T.S.E.C.C.P.B. Edición 2010.

[18] F. Medaña, R. Fernández. *Tuneladoras en Pajares*. ADIF.

[19] Z. Jian. *Tunneling in rocks* – Present technology and future challenges. Inaugural lecture EPFL. 24 May 2007

[20] D. J. López. *Voladuras en Túneles*. XVIII Curso de explosivos en las obras públicas. UPC. Marzo 2010

[21] M. J. Melis (2000). *El Túnel, clave de las infraestructuras, 149 túneles españoles y extranjeros: Métodos y velocidades de construcción*. Revista de Obras Públicas nº 3403

[22] E. Hoek & E. Brown (1997). *Underground excavations in rock*.

[23] B. Brady & E. Brown (1993). *Rock Mechanics*.

[24] H. Ehrbar (2008). *Gotthard Base Tunnel, Switzerland. Experiences with different tunneling methods*. 2º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas.

[25] G. de Rus, O. Betancor, J. Campos (2006). *Manual de evaluación económica de proyectos de transporte*. Banco Interamericano de Desarrollo.

7.2. REFERENCIAS SOBRE PÁGINAS WEB

[A] http://www.ltf-sas.com

[B] http://www.bbt-se.com

[C] http://www.jsce-int.org/

[D] http://en.wikipedia.org

[E] http://www.adif.es

[F] http://www.alptransit.ch/

[G] http://www.bls.ch

[H] http://www.vialibre-ffe.com

[I] http://jr.hakodate.jp

[J] http://www.ita-aites.org

[K] http://www.tunneltalk.com

[L] http://www.vab.sandvik.com